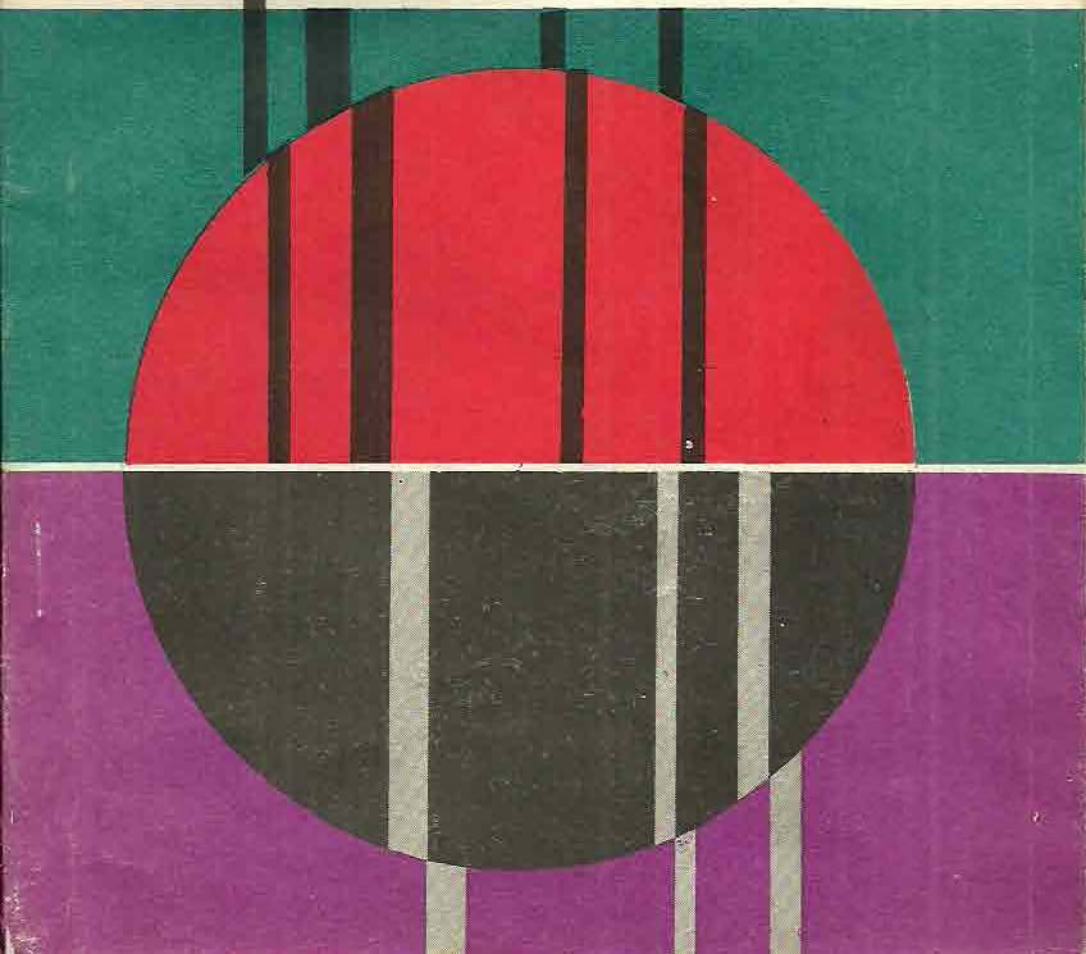
EUGENIA ISAC

X

MĂSURĂRI ELECTRICE ȘI ELECTRONICE

MANUAL PENTRU LICEE CU PROFIL DE ELECTROTEHNICĂ ȘI MATEMATICĂ-FIZICĂ, CLASA A X-A



Ing. EUGENIA ISAC
prof. gr. I

MĂSURĂRI ELECTRICE ȘI ELECTRONICE

MANUAL PENTRU LICEE CU PROFIL DE ELECTROTEHNICĂ ȘI MATEMATICĂ-FIZICĂ, CLASA A X-a

EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ
BUCUREȘTI — 1981

Manualul a fost elaborat conform programei școlare aprobate de Ministerul Educației și Învățământului cu nr. 39438/1980

Referenți: dr. ing. *Aurel Millea*
ing. *Brînduța Bolocan*, prof.
Redactor: ing. *Monica Ursea*
Tehnoredactor: *T. Bălăiță*
Coperta: *V. Wegeman*

Plan editură nr. 16008
Coli de tipar 5
Bun de tipar 16.03.81

Tiparul executat sub comanda nr. 11 la
Întreprinderea poligrafică „13 Decembrie 1918",
str. Grigore Alexandrescu nr. 89—97
București
Republica Socialistă România

INTRODUCERE

În etapa actuală de dezvoltare a societății românești, aproape că nu există domeniu al activității economico-sociale în care să nu se folosească instalații și aparate electrice și electronice. Larga răspîndire a acestora, precum și diversificarea și perfecționarea lor, necesită cadre bine pregătite, capabile să răspundă cerințelor impuse de dezvoltarea științei și tehnicii contemporane.

În scopul asigurării unei activități cît mai eficiente, în vederea obținerii unei producții maxime și de calitate în domeniul electric, toți participanții la procesul de producție, de la muncitor și pînă la cercetător, trebuie să cunoască aparatele și metodele de măsurat și utilizarea lor corectă.

Obiectul de învățămînt „Măsurări electrice și electronice" are scopul să asigure însușirea cunoștințelor, priceperilor și deprinderilor necesare, în legătură cu aparatele și metodele de măsurat, contribuind astfel la o bună formare profesională a viitorilor electricieni și electroniști.

Capitolul 1

MĂSURĂRI, MIJLOACE ŞI METODE DE MĂSURARE

A. MĂSURĂRI

În activitatea practică se întîlnesc diferite mărimi fizice, care se deosebesc între ele calitativ, după natura lor (lungimi, suprafeţe, presiuni, temperaturi, tensiuni, puteri, rezistenţe etc.) şi cantitativ.

Evaluarea cantitativă a unei mărimi de o anumită natură se realizează prin măsurare. Deci: **măsurarea** *este procesul prin care se evaluează cantitativ mărimile fizice de acelaşi fel.*

A măsura o mărime *M înseamnă a o compara cu o mărime de aceeaşi natură, U, considerată convenţional drept unitate de măsură, şi a vedea de cîte ori unitatea de măsură se cuprinde în mărimea de măsurat.*

Procesul de măsurare se poate exprima prin raportul dintre mărimea de măsurat M şi unitatea de măsură U, iar rezultatul măsurării reprezintă valoarea numerică V a mărimii de măsurat:

$$\frac{M}{U} = V. \tag{1.1}$$

Conform relaţiei (1.1), mărimea de măsurat se poate exprima prin:

$$M = V \cdot U. \tag{1.2}$$

○ **De reţinut!** *Expresia* $M = V \cdot U$ *arată că ori de cîte ori se exprimă o anumită mărime, trebuie menţionată şi unitatea de măsură, multiplii sau submultiplii acesteia* (de exemplu: $I = 2$ A; $R = 1\text{k}\Omega$; $C = 100$ μF).

1. UNITĂŢI DE MĂSURĂ

Aşa cum s-a arătat, pentru a măsura o mărime este necesar să fie stabilită unitatea de măsură a acelei mărimi.

Unitatea de măsură *este o mărime de aceeaşi natură cu mărimea de măsurat, aleasă în mod convenţional.*

În trecutul îndepărtat, în țara noastră, oamenii conveniseră să măsoare lungimile cu cotul sau prăjina, iar capacitățile — cu găleata sau cu vadra. Odată cu dezvoltarea științei și tehnicii și cu dezvoltarea schimburilor și cooperărilor dintre oameni, a fost necesar ca unitățile de măsură să fie stabilite cît mai precis și să fie recunoscute de cît mai mulți oameni. Unitățile de măsură ce se folosesc în prezent au fost stabilite prin convenții internaționale, ținîndu-se seama de nivelul de cunoaștere al omenirii la data stabilirii lor.

2. SISTEME DE UNITĂȚI DE MĂSURĂ

Deoarece pentru a efectua o măsurare este necesar să se cunoască unitatea de măsură corespunzătoare mărimii fizice ce se măsoară, trebuie să existe pentru fiecare mărime fizică cîte o unitate de măsură (de exemplu: pentru lungimi — metrul, pentru timp — secunda, pentru intensitatea curentului electric — amperul ș.a.m.d.).

Din mulțimea de unități de măsură, unele, în număr restrîns, au fost definite independent de altele și de aceea ele au fost denumite *unități fundamentale*. Celelalte unități de măsură, care se numesc *unități derivate*, pot fi definite în funcție de unitățile de măsură fundamentale pe baza legilor și a relațiilor care leagă între ele mărimile fizice corespunzătoare.

Totalitatea unităților fundamentale și derivate dintr-un anumit domeniu alcătuiesc un **sistem de unități de măsură.**

Au fost folosite mai multe sisteme de unități de măsură, care diferă între ele prin unitățile fundamentale adoptate. Astfel, în tehnică se folosea sistemul practic, MKSA, în timp ce în fizică era preferat sistemul CGS. În electromagnetism era folosit sistemul CGS electromagnetic ($CGS\mu_0$), în timp ce în electrostatică se prefera sistemul CGS electrostatic ($CGS\varepsilon_0$). Am mai putea da în acest sens numeroase exemple.

3. SISTEMUL INTERNAȚIONAL

Avînd în vedere faptul că la un moment dat se foloseau diferite sisteme de unități de măsură, ceea ce complica relațiile dintre diferite domenii de activitate, la cea de-a XI-a Conferință Generală de Măsuri și Greutăți, care a avut loc la Paris în 1960, s-a propus adoptarea unui sistem de unități de măsură care să satisfacă toate domeniile științifice și tehnice. În acest fel, s-a adoptat Sistemul Internațional de unități de măsură, cu simbolul SI, care are șapte unități fundamentale și două unități complementare.

Unitățile fundamentale sînt:

— *metru* — cu simbolul m, pentru lungimi;
— *kilogram* — cu simbolul kg, pentru masă;
— *secundă* — cu simbolul s, pentru timp;
— *amper* — cu simbolul A, pentru intensitatea curentului electric;
— *kelvin* — cu simbolul K, pentru temperatura termodinamică;
— *candelă* — cu simbolul cd, pentru intensitatea luminoasă;
— *mol* — cu simbolul mol, pentru cantitatea de substanță.

Unitățile complementare sînt:

— *radian* — cu simbolul rad, pentru unghi plan;
— *steradian* — cu simbolul sr, pentru unghi solid.

În funcție de aceste unități fundamentale și complementare se pot defini toate celelalte unități de măsură derivate.

În țara noastră Sistemul Internațional a fost adoptat în 1961 ca sistem de unități de măsură legal și obligatoriu. Legea metrologiei nr. 27/1978 stabilește că în cazuri justificate pot fi utilizate ca unități de măsură legale și alte unități în afara sistemului SI, cum sînt: grad Celsius pentru temperatură, bar pentru presiune, kilogramforță pentru forțe etc. Unitățile de măsură legale sînt specificate în anexa care face parte din legea metrologiei.

B. PROCESUL DE MĂSURARE

Într-un proces de măsurare se pornește de la mărimea de măsurat, care constituie obiectul măsurării. Apoi se stabilește cu ce se va executa măsurarea și cum se va face aceasta. Avînd în vedere cele de mai sus, putem spune că în procesul de măsurare intervin următoarele elemente:

— *obiectul măsurării* (ce se măsoară?);
— *mijloacele de măsurare* (cu ce se măsoară?);
— *metodele de măsurare* (cum se măsoară?).

1. MIJLOACE DE MĂSURARE

Mijloacele de măsurare *reprezintă totalitatea mijloacelor tehnice utilizate în procesul de măsurare.*

● **În funcție de complexitatea lor,** mijloacele de măsurare se împart în:

— *măsuri;*
— *aparate de măsurat;*
— *instalații de măsurat.*

Măsura *este materializarea unității de măsură sau a unui multiplu sau submultiplu al acesteia.*

Exemple: metrul (din lemn sau din metal), ruleta (de 1 m sau de 10 m), rezistorul etalon, condensatorul etalon etc.

Aparatul de măsurat *este un sistem tehnic care permite determinarea cantitativă a mărimilor ce se măsoară.*

Exemple: ampermetrul, voltmetrul, ohmmetrul etc.

Instalația de măsurat *este un ansamblu de aparate și măsuri conectate între ele după o anumită schemă în scopul realizării unor măsurări.*

Exemple: instalația folosită la măsurarea rezistențelor electrice prin metoda ampermetrului și voltmetrului, instalațiile utilizate la etalonarea aparatelor de măsurat electrice, instalațiile de telemăsurări etc.

● **După precizia lor,** mijloacele de măsurare se împart în:

— *mijloace de măsurare etalon sau etaloane;*

— *mijloace de măsurare de lucru.*

Mijloacele de măsurare etalon sînt cele mai precise mijloace de măsurare. Ele *servesc la definirea, materializarea, conservarea sau reproducerea unității de măsură în scopul transmiterii unității către alte mijloace de măsurare.*

La rîndul lor, etaloanele sînt de mai multe categorii:

— *etalon primar* — etalonul care întrunește cele mai ridicate calități metrologice. În unele cazuri, etaloanele primare pot deveni etaloane internaționale sau etaloane naționale. Etaloanele internaționale sînt recunoscute prin acorduri internaționale, iar etaloanele naționale sînt atestate printr-o decizie oficială a unei țări și constituie baza metrologică a țării respective;

— *etaloane secundare.* Transmiterea unității de măsură se realizează pornind de la etalonul național, care este și etalon primar; cu ajutorul unei instalații și metode adecvate se etalonează etaloanele secundare de ordinul I, de la care, prin mijloace tehnice similare, unitatea de măsură se transmite la etaloanele secundare de ordinul II ș.a. m.d.;

— *etalon de lucru* — etalonul a cărui valoare este atribuită prin comparație cu un etalon secundar și care servește la verificarea mijloacelor de măsurat.

Mijloacele de măsurare de lucru *sînt cele cu care se execută măsurările cerute de practică.*

2. METODE DE MĂSURARE

Metodele de măsurare *reprezintă ansamblul de procedee folosite pentru obținerea informației de măsurare.* Ele arată cum se execută măsurările.

După modul în care se obține rezultatul măsurării, metodele de măsurare se împart în *metode indirecte* și *metode directe.*

a. Metode de măsurare indirecte

Metodele de măsurare indirecte *sînt acele metode în care se măsoară alte mărimi, iar valoarea mărimii de măsurat se obține prin calcul* (de exemplu, măsurarea rezistențelor prin metoda ampermetrului și voltmetrului).

b. Metode de măsurare directe

Metodele de măsurare directe *sînt acele metode în care se măsoară nemijlocit mărimea de măsurat.* Metodele directe pot fi *cu citire directă* sau *de comparație.*

● **Citirea directă** se folosește în cazul aparatelor care au scara gradată direct în unități ale mărimii de măsurat (de exemplu: ampermetre, voltmetre, ohmmetre etc.).

● **Metodele de comparație** pot fi: *metode de substituție, metode diferențiale, metode de zero* și altele.

Metoda de substituție constă în înlocuirea mărimii de măsurat A_x existente într-o anumită instalație de măsurare, cu o mărime cunoscută și variabilă A_0, care se modifică pînă cînd indicațiile aparatelor de măsurat vor fi aceleași ca și în cazul cînd în instalație se află mărimea A_x. În acest caz $A_x = A_0$.

Metoda de zero se bazează pe acțiunea simultană, dar de sens contrar, a mărimii de comparație și a mărimii de măsurat asupra unui aparat detector de nul. Mărimea de comparație se variază pînă cînd detectorul de nul indică zero. În acest caz, valoarea mărimii de măsurat este dată de valoarea mărimii de comparație. Operația de măsurare are caracterul unui proces de reglaj în buclă închisă, ceea ce asigură metodei o precizie ridicată. Metoda de zero se folosește la măsurarea tensiunilor electrice cu compensatoarele și la măsurarea mărimilor electrice cu punțile echilibrate.

Metoda diferențială se caracterizează prin aceea că aparatul de măsurat măsoară diferența $A_x - A_0 = A$, unde A_x este mărimea de măsurat, iar A_0 — o mărime de aceeași natură cu A_x, dar cunoscută cu o anumită precizie. Precizia măsurării este cu atît mai mare cu cît diferența A este mai mică.

C. ERORI DE MĂSURARE

1. DEFINIȚII

Orice mărime care se măsoară are o valoare a sa adevărată X, dar oricît de îngrijit s-ar efectua măsurarea, folosind cele mai perfecționate mijloace și metode de măsurare, niciodată nu se va cunoaște valoarea adevărată. De aceea se spune că ea este inaccesibilă măsurărilor. Rezultatul obținut prin măsurare poate să difere mai mult sau mai puțin de valoarea adevărată.

● **Eroarea absolută.** Deoarece valoarea adevărată nu poate fi cunoscută, pentru aprecierea calității unei măsurări se compară valoarea măsurată X_m, cu o valoare de referință X_0 obținută prin măsurări efectuate cu metodele și mijloacele de măsurare cele mai precise. În acest caz, se poate considera eroarea absolută de măsurare ca fiind:

$$\varepsilon = X_m - X_0. \tag{1.3}$$

Eroarea absolută se exprimă în aceleași unități de măsură ca și mărimea de măsurat și poate fi pozitivă sau negativă după cum X_m este mai mare sau mai mic decît X_0. Eroarea absolută arată cu cît s-a greșit în cadrul unei măsurări față de valoarea de referință, dar nu dă direct nici o informație utilă asupra gradului de precizie al măsurării.

● **Eroarea relativă.** Pentru a aprecia precizia unei măsurări, trebuie să se compare eroarea absolută cu valoarea mărimii măsurate. În acest scop se definește eroarea relativă, care reprezintă *raportul între eroarea de măsurat absolută și valoarea de referință:*

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{X_0} = \frac{X_m - X_0}{X_0}. \tag{1.4}$$

Eroarea relativă este un număr fără dimensiuni și se exprimă de obicei în procente.

Pentru a înțelege mai bine necesitatea definirii erorii relative, se dau următoarele exemple.

Exemplul 1. La ieșirea unui redresor se măsoară tensiunea cu un voltmetru care indică 251 V în loc de 250 V. În acest caz:

$$X_0 = 250 \text{ V}; \quad X_m = 251 \text{ V};$$

$$\varepsilon = X_m - X_0 = 251 - 250 = 1 \text{ V};$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{X_0} = \frac{1}{250} = 0{,}004 = 0{,}4\%.$$

Exemplul 2. La măsurarea tensiunii la bornele unei rezistențe, voltmetrul utilizat indică 5 V în loc de 6 V. În acest caz:

$$X_0 = 6\,\text{V}; \quad X_m = 5\,\text{V};$$

$$\varepsilon = X_m - X_0 = 5 - 6 = -1\,\text{V};$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{X_0} = \frac{1}{6} = 0{,}66 = 16{,}6\%$$

După cum se vede din cele două exemple, aceeași eroare absolută de măsurare are efecte diferite. Pentru a obține o informație asupra preciziei măsurării, este necesar să se calculeze eroarea relativă.

2. CLASIFICAREA ERORILOR

● **După cauza care le produce,** erorile se împart în *erori subiective* și *erori obiective.*

Erorile subiective sînt datorate operatorului, depinzînd de atenția, îndemînarea și starea organelor sale de percepție.

Erorile obiective sînt cele care se datoresc imperfecțiunii aparatelor de măsurat, influențelor diferiților factori externi sau metodei insuficient de exacte.

● **Din punctul de vedere al caracterului lor,** erorile pot fi *sistematice, aleatoare* sau *întîmplătoare* și *grave.*

Erorile sistematice sînt acele erori care intervin cu aceleași valori ori de cîte ori se repetă măsurarea în condiții identice. Ele se pot datora imperfecțiunilor de construcție și de etalonare ale aparatelor de măsurat, influențelor controlabile ale mediului sau metodei care se folosește. Aceste erori se pot determina și se poate ține seama de ele aplicînd *corecția.* Corecția este egală cu eroarea absolută de măsurare, considerată cu semn schimbat. Ea se adaugă la rezultatul măsurării pentru a obține o valoare mai apropiată de cea adevărată.

Exemplu. Se cunoaște că un miliampermetru cu scară liniară are o eroare sistematică de 1 mA în plus (deci $\varepsilon = 1$ mA). Dacă la o măsurare se obține $X_m = 25$ mA, aplicînd corecția:

$$C = -\varepsilon = -1\,\text{mA}$$

valoarea corectată va fi:

$$X'_m = X_m + C = 25 - 1 = 24\,\text{mA}.$$

Erori aleatoare (întîmplătoare) sînt acele erori care intervin cu valori și semne diferite cînd măsurarea se repetă. Aceste erori se pot datora fluctuațiilor de indicație ale aparatelor (din cauza frecărilor, uzurii unor piese), influențelor necontrolabile ale mediului sau operatorului.

Pentru a micșora influența erorilor întîmplătoare asupra rezultatului măsurării, se recomandă să se repete de mai multe ori măsurarea mărimii respective și să se facă apoi media aritmetică a valorilor obținute. Astfel, dacă pentru determinarea unei mărimi au fost efectuate n măsurări în urma cărora s-au găsit valorile $x_1, x_2, \ldots, x_n$, valoarea cea mai probabilă a mărimii măsurate este:

$$x = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n}.$$

Erori grave sau *greșeli* sînt acele erori care intervin cu valori foarte mari. Ele se pot datora folosirii aparatelor defecte, alegerii necorespunzătoare a aparatelor sau metodelor, calculelor greșite sau neatenției operatorului. Greșelile trebuie evitate și pentru a le putea evita trebuie să se cunoască foarte bine aparatele și metodele de măsurare, precum și instalațiile, echipamentele, sau aparatele asupra cărora se fac măsurări.

3. ERORILE APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

Așa cum s-a arătat, în efectuarea unei măsurări, unele erori sînt datorate imperfecțiunii aparatelor de măsurat. În momentul măsurării, indicația a a aparatului de măsurat ar trebui să corespundă valorii adevărate X. În realitate, el oferă o indicație a_m corespunzătoare valorii măsurate X_m. Diferența între indicația în momentul măsurării și indicația exactă reprezintă *eroarea instrumentală:*

$$\varepsilon_i = a_m - a. \tag{1.5}$$

Eroarea instrumentală se exprimă în aceleași unități ca și mărimea de măsurat și poate avea diferite valori.

● Valoarea maximă admisibilă a erorii instrumentale reprezintă **eroarea instrumentală tolerată.** Aceasta caracterizează fiecare aparat și este stabilită prin construcție de producătorul de aparate de măsurat.

De exemplu, un miliampermetru de 100 mA poate avea o eroare instrumentală tolerată de 1 mA.

● Eroarea instrumentală tolerată arată cu cît poate greși un aparat de măsurat, dar nu dă direct o informație utilă despre calitatea aparatului. Pentru caracterizarea preciziei unui aparat de măsurat este

necesar să se compare eroarea instrumentală tolerată cu valoarea maximă pe care o indică aparatul respectiv. Se obține astfel **eroarea raportată tolerată,** care se exprimă de obicei în procente:

$$\varepsilon_{i_{rap}} = \frac{(a_m - a)_{max}}{a_{max}} \cdot 100\,[\%], \tag{1.6}$$

unde a_{max} este indicația maximă (valoarea de la capătul scării).

Eroarea raportată tolerată este o mărime specifică fiecărui aparat de măsurat și în funcție de ea se stabilește clasa de precizie.

4. CLASE DE PRECIZIE ALE APARATELOR

Clasa de precizie a unui aparat de măsurat electric *este un număr egal cu eroarea raportată tolerată* (maxim admisă) *exprimată în procente.* Clasa de precizie este indicată pe cadranul fiecărui aparat de măsurat.

Pentru aparatele de măsurat electrice fabricate în R. S. România, conform STAS 4640/1-71 se folosesc următoarele clase de precizie: 0,05—0,1—0,2—0,5—1—1,5—2,5—5.

Clasa de precizie caracterizează aparatul și nu măsurarea. Pentru a obține o precizie cît mai bună a măsurării, se recomandă să se folosească aparatul de măsurat astfel încît să se obțină o indicație cît mai mare (în cea de-a doua jumătate a scării gradate).

Exemplu. Un miliampermetru de 50 mA cu clasa de precizie 1 are o eroare raportată tolerată de 1%. Eroarea instrumentală maximă va fi:

$$(a_m - a)_{max} = \varepsilon_{i_{rap}} \cdot a_{max} = 0{,}01 \cdot 50 = 0{,}5\ \text{mA}.$$

Cînd se măsoară cu acest aparat $I_1 = 50$ mA, eroarea relativă maximă a măsurării va fi:

$$\varepsilon_{r1} = \frac{(a_m - a)_{max}}{I_1} = \frac{0{,}5}{50} = 1\%.$$

Dacă se măsoară cu același aparat $I_2 = 25$ mA, eroarea relativă a măsurării va fi:

$$\varepsilon_{r2} = \frac{0{,}5}{25} = 2\%.$$

În caz că se măsoară $I_3 = 5$ mA, eroarea relativă a măsurării va fi:

$$\varepsilon_{r3} = \frac{0{,}5}{5} = 10\%.$$

Din exemplele de mai sus se vede că la același aparat eroarea relativă a măsurării este cu atît mai bună cu cît indicația este mai mare.

D. CARACTERISTICI METROLOGICE

Caracteristicile metrologice ale aparatelor de măsurat electrice sînt criterii de calitate ale acestora, care se au în vedere de obicei și la verificările metrologice inițiale sau periodice. Dintre caracteristicile metrologice ale aparatelor de măsurat electrice, cele mai importante sînt: *sensibilitatea, justețea, fidelitatea* și *precizia.*

● **Sensibilitatea** este caracteristica metrologică a unui aparat de măsurat care exprimă raportul între variația mărimii de ieșire și variația mărimii de intrare (a mărimii de măsurat):

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X}. \tag{1.7}$$

Relația (1.7) arată că cu cît variația mărimii de ieșire este mai mare pentru aceeași variație a mărimii de măsurat, cu atît sensibilitatea este mai mare.

Pragul de sensibilitate este cea mai mică variație a mărimii de măsurat care determină o variație perceptibilă a mărimii de ieșire. Uneori pragul de sensibilitate se mai numește și *rezoluție.*

● **Justețea** este proprietatea unui aparat de măsurat de a da indicații medii cît mai apropiate de valoarea adevărată a mărimii de măsurat. Justețea depinde de erorile sistematice și este cu atît mai bună cu cît erorile sistematice sînt mai mici.

● **Fidelitatea** este proprietatea unui aparat de măsurat de a da indicații cît mai apropiate între ele cînd măsurarea se repetă în condiții identice. Fidelitatea este cu atît mai bună, cu cît erorile întîmplătoare (fluctuațiile de indicație) sînt mai mici.

● **Precizia** este o caracteristică metrologică globală a unui aparat de măsurat. Ea exprimă proprietatea aparatului de a da indicații cît mai apropiate de valoarea adevărată (de a avea erori cît mai mici). La un aparat de măsurat precizia este cu atît mai mare cu cît fidelitatea și justețea sînt mai bune.

E. NOȚIUNI DE LEGISLAȚIE METROLOGICĂ

În condițiile dezvoltării științei și tehnicii și ale extinderii cooperării atît pe plan național cît și pe plan internațional, este necesar să se asigure o funcționare corectă și precisă a mijloacelor de măsurare. În vederea satisfacerii acestor cerințe este necesar ca mijloacele de măsurare să fie supuse verificării metrologice înainte de punerea lor în funcțiune, după fiecare revizie sau reparație și periodic în cursul utilizării lor.

În țara noastră, conform legii metrologiei nr. 27/1978, toate mijloacele de măsurare care se construiesc, se importă, se repară și se folosesc sînt supuse verificărilor de stat obligatorii, care sînt efectuate de Inspectoratul General de Stat pentru Controlul Calității Produselor.

Pentru verificarea metrologică se efectuează diferite operații metrologice, adică diverse lucrări în scopul de a constata dacă performanțele mijloacelor de măsurare corespund sau se mențin în limitele impuse de standarde, norme sau alte prescripții în vigoare.

Operațiile metrologice care se efectuează asupra mijloacelor de măsurare etalon se numesc *etalonări*, iar cele ce se efectuează asupra mijloacelor de măsurare de lucru se numesc *verificări*.

Etalonările și verificările se fac obligatoriu:

— inițial, pentru mijloacele de măsurare noi, înainte de darea lor în folosință;

— periodic, asupra mijloacelor de măsurare în folosință la termene stabilite prin norme tehnice de metrologie;

— ocazional, în urma reparațiilor și ori de cîte ori este necesar pentru a asigura funcționarea corespunzătoare a mijloacelor de măsurare.

În urma etalonării se emite certificatul de etalonare, în care sînt trecute toate datele necesare identificării etalonului respectiv și datele obținute pentru fiecare punct în parte.

Pentru mijloacele de măsurare de lucru, în urma verificării se eliberează un buletin de verificare în care se menționează datele necesare identificării, precum și rezultatul verificării: „Admis" sau „Respins".

Mijloacele de măsurare admise la etalonări sau verificări de stat se investesc cu marca de stat. Marca de stat are și rolul de a sigila mijloacele de măsurare verificate, astfel încît să nu se poată interveni la mecanismele lor fără a o deteriora.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Ce importanță au măsurările în activitatea practică?
2. Cum se poate contribui la obținerea unor măsurări de calitate?
3. În ce clasă de precizie este un aparat de măsurat dacă are eroarea raportată tolerată de 1%? Dar dacă are 0,4%?
4. Ce condiții trebuie să îndeplinească un mijloc de măsurare pentru a fi legal?

Capitolul 2

APARATE DE MĂSURAT ELECTRICE

A. NOȚIUNI GENERALE

Aparatele de măsurat electrice sînt mijloace de măsurare care permit determinarea cantitativă a mărimilor electrice, sau a mărimilor neelectrice prin intermediul unei mărimi electrice.

● **Aparatele de măsurat electrice** se realizează într-o mare varietate de tipuri constructive, dar oricît de complicate ar fi, ele **pot fi considerate ca fiind alcătuite** dintr-un *traductor, dispozitive intermediare* și un *instrument de măsurat,* conform schemei din figura 2.1.

Traductorul este un dispozitiv care transformă, cu o anumită eroare limită, mărimea aplicată la intrarea sa într-o altă mărime obținută la ieșire. De obicei în aparatele de măsurat electrice traductorul transformă o mărime neelectrică într-o mărime electrică.

Exemple de traductoare: termocuplul, termorezistența etc.

Dispozitivele intermediare au rolul a de prelucra și adapta mărimile de la intrarea lor pînă la obținerea necesare la intrarea instrumentului de măsurat.

Exemple de dispozitive intermediare: amplificatoare, atenuatoare, circuite de detecție etc.

Instrumentul de măsurat este un mijloc de măsurare care transformă semnalul de la intrarea sa într-o mărime perceptibilă cu ajutorul căreia se determină valoarea mărimii măsurate. Mărimea perceptibilă de la

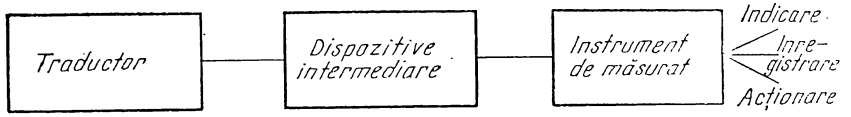


Fig. 2.1. Schemă funcțională generală a aparatelor de măsurat electrice.

ieșire poate să fie urmărită direct de un operator sub formă de *indicație*, poate fi *înregistrată* sau poate fi transmisă unor dispozitive de *acționare, stocare sau prelucrare a informațiilor de măsurare.*

○ **Trebuie menționat că** la unele aparate unele componente pot să lipsească. În unele măsurări instrumentul de măsurat poate fi folosit fără traductor și fără dispozitive intermediare. În acest caz, instrumentul de măsurat singur poate fi considerat aparat de măsurat.

● **Aparatele de măsurat electrice** se împart în două mari **categorii:**
— *aparate de măsurat numerice;*
— *aparate de măsurat analogice.*

Aparatele de măsurat numerice se caracterizează prin faptul că semnalul de la ieșirea lor este discretizat (variază discontinuu), iar instrumentul de măsurat îl prezintă direct sub formă numerică.

Aparatele de măsurat analogice se caracterizează prin faptul că mărimea perceptibilă de la ieșirea lor are o variație continuă. Dacă aparatul furnizează valoarea mărimii măsurate direct sub forma unei indicații vizuale pe un dispozitiv de citire, el se numește *aparat indicator.*

B. APARATE ANALOGICE INDICATOARE

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Funcționarea aparatelor de măsurat indicatoare se bazează pe transformarea unei părți din energia electrică sau magnetică a mărimii de măsurat sau a semnalului electric intermediar în energie mecanică, care produce mărimea perceptibilă de la ieșire, respectiv deplasarea unui indicator în fața unei scări gradate. Transformarea energiei are loc în conformitate cu fenomenul fizic care stă la baza construcției și funcționării instrumentului de măsurat.

Instrumentele de măsurat ale aparatelor indicatoare au în construcția lor o parte fixă și o parte mobilă (echipaj mobil).

● Partea mobilă, pe care este fixat și indicatorul, se deplasează sub acțiunea unui cuplu de forțe, denumit **cuplu activ,** M_a, care apare ca urmare a interacțiunii dintre mărimile fizice (dintre care de obicei una este mărimea de măsurat sau semnalul electric intermediar) existente în cele două părți ale instrumentului. Cuplul activ depinde de valoarea mărimii de măsurat X, fiecărei valori a mărimii de măsurat corespunzându-i o valoare bine determinată a cuplului activ, adică:

$$M_a = f(X). \tag{2.1}$$

● Dacă asupra echipajului mobil ar acționa numai cuplul activ, acesta s-ar deplasa pînă la limita extremă indiferent de valoarea mărimii de măsurat. Pentru ca fiecărei valori a mărimii de măsurat să-i corespundă o anumită deplasare a echipajului mobil, cuplul activ este echilibrat cu un cuplu de sens contrar proporțional cu deplasarea α a echipajului mobil, denumit **cuplu rezistent,** M_r,

$$M_r = D\,\alpha, \tag{2.2}$$

unde D este o constantă constructivă denumită *cuplu specific.*

● **Caracteristica statică de funcționare.** Echipajul mobil se rotește sub acțiunea simultană a celor două cupluri, pînă cînd cuplul rezistent crescînd cu unghiul de rotire devine egal cu cuplul activ. *Poziția de echilibru se caracterizează deci prin aceea că suma cuplurilor care acționează asupra echipajului mobil este zero.* Dacă se neglijează cuplul de frecări, această condiție se scrie:

$$M_a - M_r = 0. \tag{2.3}$$

Înlocuindu-se în această relație cele două cupluri cu expresiile lor (relațiile 2.1 și 2.2), se obține:

$$f(X) - D\alpha = 0,$$

de unde:

$$\alpha = \frac{1}{D} f(X) = F(X),$$

deci

$$\alpha = F(X), \tag{2.4}$$

unde $F(X)$ este o funcție caracteristică fiecărui tip de aparat de măsurat.

Relația (2.4) exprimă dependența dintre deviația α a echipajului mobil și mărimea de măsurat și reprezintă caracteristica statică de funcționare a aparatelor de măsurat indicatoare.

2. CLASIFICAREA APARATELOR DE MĂSURAT INDICATOARE

Aparatele de măsurat se construiesc într-o mare varietate și de aceea este necesară o clasificare a lor. Clasificarea se poate face după mai multe criterii.

● **După mărimea măsurată,** aparatele pot fi: *ampermetre, ohmmetre, voltmetre* etc.

● **După precizie,** aparatele de măsurat pot fi în una din următoarele clase: 0,05—0,1—0,2—0,5—1—1,5—2,5—5.

● **După utilizare** pot fi:

— *aparate de tablou* (clasele 0,5 ... 5);

— *aparate de laborator* (clasele 0,05 ... 0,5);

— *aparate tehnice* (clasele 1 ... 5).

● **După natura fenomenelor pe care se bazează funcționarea lor** se deosebesc:

— *aparate magnetoelectrice*, care folosesc interacțiunea dintre cîmpul unui magnet permanent și o bobină parcursă de curentul de măsurat; în funcție de elementul care este mobil, aceste aparate se împart în aparate *cu bobină mobilă* și aparate *cu magnet mobil*;

— *aparate feromagnetice* (cu fier mobil), care conțin o piesă mobilă din material feromagnetic supusă acțiunii cîmpului creat de o bobină fixă parcursă de curentul de măsurat;

— *aparate electrodinamice*, care folosesc acțiunile forțelor electrodinamice ce se exercită între bobine fixe și mobile parcurse de curenți;

— *aparate ferodinamice*, în care forțele electrodinamice sînt sporite de piese feromagnetice așezate în calea liniilor de cîmp magnetic;

— *aparate de inducție*, care folosesc acțiunea cîmpului magnetic variabil al unor circuite inductoare fixe asupra unor piese conductoare mobile în care induc curenți;

— *aparate termice cu fir cald*, în care echipajul mobil se deplasează ca urmare a dilatării firelor încălzite direct sau indirect de curentul de măsurat;

— *aparate bimetalice*, în care deformarea unei lamele din bimetal datorită încălzirii sale directe sau indirecte de către curentul de măsurat este transmisă echipajului mobil;

— *aparate cu termocuplu*, în care mărimea electrică de măsurat produce încălzirea unui termocuplu a cărui tensiune electromotoare este măsurată cu ajutorul unui aparat magnetoelectric;

— *aparate cu redresor*, formate dintr-un aparat magnetoelectric asociat cu un dispozitiv redresor, cu care se măsoară curenți sau tensiuni alternative;

— *aparate electrostatice*, care funcționează sub influența forțelor electrostatice care se exercită între piese metalice fixe și mobile între care există o diferență de potențial electric;

— *aparate cu lame vibrante*, în care lamele metalice, fiecare dintre ele avînd o frecvență proprie de rezonanță, vibrează sub acțiunea cîmpului creat de un curent alternativ, care parcurge bobine fixe;

— *logometre*, aparate cu două circuite de măsurare, destinate să măsoare raportul a două mărimi electrice; ele pot fi: magnetoelectrice, ferodinamice, electrodinamice, feromagnetice și de inducție;

— *aparate electronice*, care au în construcția lor componente electronice.

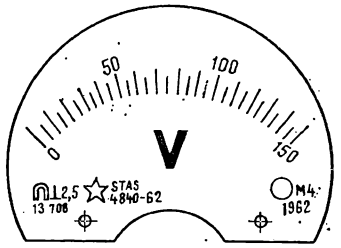


Fig. 2.2. Inscripțiile de pe cadranul unui aparat de măsurat electric.

3. MARCAREA APARATELOR DE MĂSURAT ELECTRICE

În conformitate cu STAS 4640/4-74, pe cadranul fiecărui aparat de măsurat se înscriu următoarele date:

— numele sau marca producătorului;
— unitatea de măsură, indicată prin simbolul său;
— numărul seriei și anul fabricației;
— clasa de precizie;
— natura curentului (continuu sau alternativ);
— tensiunea de încercare a rigidității dielectrice;
— simbolul care indică fenomenele ce stau la baza funcționării aparatului (principiul de funcționare);
— tipul aparatului;
— simbolul poziției normale de funcționare.

Simbolurile utilizate pentru aceste inscripții sînt arătate în tabelul 2.1.

În figura 2.2 este reprezentat cadranul unui voltmetru fabricat de „Întreprinderea de aparate electrice de măsurat" — Timișoara.

4. PĂRȚILE COMPONENTE ALE APARATELOR DE MĂSURAT

Deși sînt de o mare diversitate din punctul de vedere al construcției și principiului de funcționare, aparatele de măsurat electrice sînt alcătuite dintr-o serie de elemente componente comune, în ceea ce privește funcția îndeplinită în aparat. Dintre acestea fac parte:

— *dispozitivul pentru producerea cuplului activ;*
— *dispozitivul pentru producerea cuplului rezistent;*
— *dispozitivul de citire;*
— *corectorul de zero;*
— *amortizorul.*

○ **Trebuie precizat că** s-a avut în vedere cazul cel mai simplu, și anume acela cînd aparatul de măsurat se reduce la instrumentul de măsurat.

a. Dispozitivul pentru producerea cuplului activ

Conform principiului de funcționare al aparatelor de măsurat indicatoare, acestea trebuie să conțină un dispozitiv pentru producerea cuplului activ. De obicei, el este format dintr-o *parte fixă* și o *parte mobilă* (echipaj mobil), care interacționînd dau naștere cuplului activ.

Simbolurile aparatelor de măsurat electrice

I. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE	
Felul aparatului	Simbol
Magnetoelectric (cu cadru mobil)	
Magnetoelectric (cu magnet mobil)	
Logometru magnetoelectric	
Feromagnetic	
Logometru feromagnetic	
Electrodinamic	
Logometru electrodinamic	
Ferodinamic	
Logometru ferodinamic	
De inducție	
Electrostatic	
Termic cu fir cald	
Bimetalic	
Magnetoelectric cu termocuplu	
Magnetoelectric cu redresor	
Cu lame vibrante	

II. NATURA CURENTULUI	
Felul curentului	Simbol
Curent continuu	
Curent alternativ	
Curent continuu și alternativ monofazat	

III. CLASA DE PRECIZIE	
Erorile (exprimate în procente) raportate la:	Simbol
Valoarea maximă a domeniului de măsurare	
Lungimea scării gradate	
Valoare exactă	

IV. POZIȚIA NORMALĂ DE FUNCȚIONARE	
Poziția cadranului	Simbol
Verticală	
Orizontală	
Înclinată față de orizontală (ex. 60°).	

V. TENSIUNEA DE ÎNCERCARE DIELECTRICĂ	
Valoarea tensiunii	Simbol
500 V	
Peste 500 V (de ex. 2 kV)	
Fără încercare dielectrică	

În funcție de fenomenele fizice care stau la baza principiului de funcționare al diferitelor aparate, elementele care alcătuiesc dispozitivul pentru producerea cuplului activ sînt realizate în diferite forme constructive.

● **Partea fixă** poate fi alcătuită din magneți permanenți (la aparatele magnetoelectrice), din bobine (la aparatele feromagnetice, electrodinamice și ferodinamice), din electromagneți (la aparatele de inducție) etc.

● **Echipajul mobil** poate fi construit din bobine mobile (la aparatele magnetoelectrice, electrodinamice și ferodinamice), din plăci metalice (la aparatele feromagnetice și electrostatice), din discuri nemagnetice (la aparatele de inducție) etc.

Echipajul mobil este fixat pe un ax care se sprijină în lagăre sau este suspendat pe benzi de torsiune sau pe fire de torsiune.

b. Dispozitivul pentru producerea cuplului rezistent

Cuplul rezistent, care se opune cuplului activ, este creat în majoritatea aparatelor de măsurat de *arcuri spirale* sau de *firele sau benzile de care este suspendat echipajul mobil.* Pentru realizarea acestor elemente se folosesc benzi sau fire din diferite materiale elastice și nemagnetice (de obicei bronz fosforos sau bronz cu cadmiu). Cuplul rezistent specific depinde de dimensiunile firelor sau benzilor și de calitățile elastice ale materialelor folosite.

c. Dispozitivul de citire

În timpul măsurării, echipajul mobil se deplasează sub acțiunea celor două cupluri. Cînd suma acestora este nulă, echipajul mobil rămîne într-o poziție de echilibru. Echilibrul cuplurilor este indicat prin poziția unui indicator, solidar legat cu echipajul mobil, în fața unei scări gradate. Deci dispozitivul de citire este compus din *indicator* și din *scara gradată.*

● La cele mai multe aparate de măsurat electrice analogice, **indicatorul** este un *ac* rigid fixat de axul sistemului mobil și echilibrat de *două contragreutăți* plasate în partea opusă, astfel încît centrul de greutate al sistemului să rezulte în axa de rotație. Acele indicatoare se execută din duraluminiu sau din sticlă și au diferite forme. *La aparatele de tablou,* vîrful acului are formă de săgeată sau de bară, iar *la aparatele de precizie,* formă de lamă de cuțit sau de fir, așa cum sînt prezentate în figura 2.3.

La aparatele de mare sensibilitate indicatorul este un spot luminos: o rază de lumină produsă de o sursă se reflectă pe o oglindă fixată pe axul echipajului mobil și formează o pată de lumină (spot) pe scara

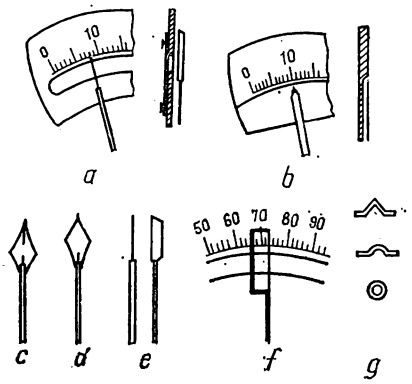


Fig. 2.3. Ace indicatoare.

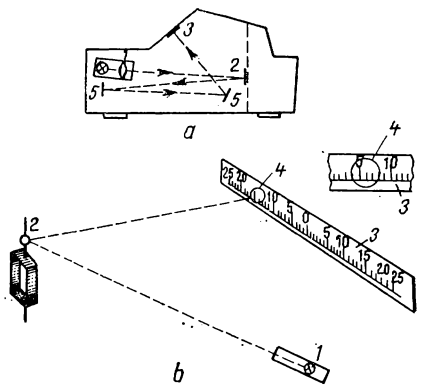


Fig. 2.4. Indicator cu spot luminos:
a — în interiorul aparatului; *b* — indicator exterior; *1* — sursă de lumină; *2* — oglindă; *3* — scară gradată; *4* — spot; *5* — oglinzi reflectoare.

gradată a aparatului. Scara gradată și sursa de lumină pot fi în interiorul aparatului (fig. 2.4, *a*) sau în exterior (fig. 2.4, *b*).

● **Scara gradată** este o succesiune de repere trasate pe cadranul aparatului corespunzător unui șir de valori ale mărimii de măsurat. În figura 2.5 sînt reprezentate diferite tipuri de scări gradate.

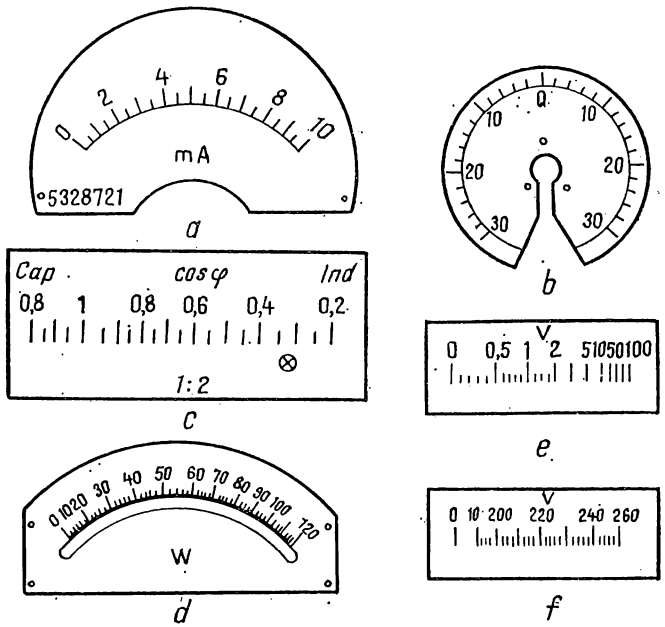


Fig. 2.5. Scări gradate.

d. Corectorul de zero

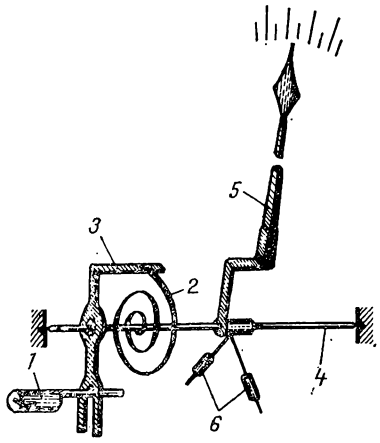


Fig. 2.6. Corectorul de zero:
1 — buton crestat; *2* — arc spiral; *3* — pîrghie; *4* — axul sistemului mobil; *5* — ac indicator; *6* — contragreutăți.

Dacă la intrarea în aparat nu se aplică nici un semnal, echipajul mobil este adus la zero de arcurile spirale sau de benzile de suspensie. Deoarece, din diferite cauze, poziția indicatorului se poate abate de la reperul zero, aparatele de măsurat electrice sînt prevăzute cu un dispozitiv care permite aducerea indicatorului la poziția corectă. Corectorul de zero, reprezentat în figura 2.6, conține un buton crestat *1* accesibil din exteriorul aparatului, care se prelungește cu o tijă așezată excentric față de axa de rotație. Această tijă acționează pîrghia *3* de care este fixat un capăt al unui arc spiral *2*. Celălalt capăt al arcului fiind fixat pe axul sistemului mobil, cînd se rotește butonul crestat de pe carcasa aparatului, pîrghia *3* acționează asupra arcului spiral *2* și produce deplasarea întregului sistem mobil. Astfel indicatorul poate fi adus în dreptul reperului zero al scării gradate.

e. Amortizorul

Amortizorul servește la amortizarea oscilațiilor indicatorului în jurul poziției de echilibru. Fără acest dispozitiv, citirea indicațiilor ar fi mult îngreuiată. Amortizoarele sînt în general de două feluri:

— *amortizoare pneumatice;*

— *amortizoare electromagnetice.*

● **Amortizoarele pneumatice** conțin o paletă (fig. 2.7, *a*) sau un piston (fig. 2,7, *b*) solidar legate cu axul echipajului mobil și care se deplasează în interiorul unor camere închise. Cînd echipajul mobil tinde să oscileze, paleta sau pistonul comprimă aerul din camera închisă și acesta se opune oscilațiilor.

● **Amortizoarele electromagnetice,** reprezentate în figura 2.8, constau dintr-o piesă metalică nemagnetică *a* fixată pe axul echipajului mobil și introdusă în cîmpul magnetic al unui magnet permanent *M*. Cînd

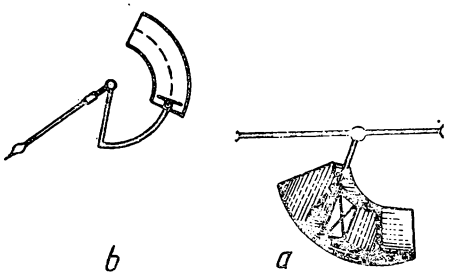


Fig. 2.7. Amortizoare pneumatice: *a* — cu piston; *b* — cu paletă.

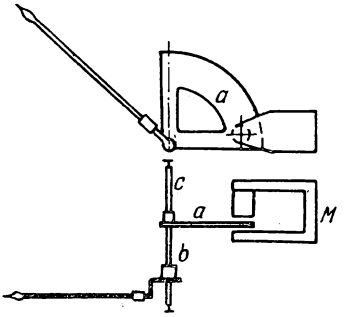


Fig. 2.8. Amortizor electromagnetic.

echipajul mobil tinde să oscileze, în piesa metalică apar curenți induși, al căror efect este de a se opune cauzei ce i-au produs, amortizînd în acest mod mișcarea.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Ce se înțelege prin aparat de măsurat?
2. În afară de aparatele de măsurat indicatoare, ce alte tipuri de aparate de măsurat mai există?
3. La aparatele indicatoare cum se obține energia necesară deplasării indicatorului?
4. Ce se întîmplă la un aparat dacă dispozitivul pentru producerea cuplului rezistent nu mai funcționează?
5. Ce se întîmplă la un aparat de măsurat dacă amortizorul nu mai funcționează?
6. Cum se poate regla din exteriorul aparatului poziția indicatorului?

Capitolul 3

MĂSURĂRI ÎN CURENT CONTINUU

A. APARATE MAGNETOELECTRICE (CU BOBINĂ MOBILĂ)

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Funcționarea aparatelor magnetoelectrice se bazează pe interacțiunea dintre cîmpul magnetic al unui magnet permanent și o bobină mobilă parcursă de curentul de măsurat (curent continuu). În urma acestei interacțiuni apare un cuplu activ care pune în mișcare bobina mobilă împreună cu întregul echipaj mobil.

2. DESCRIEREA APARATULUI

Din principiul de funcționare se observă că elementele de bază ale aparatelor magnetoelectrice sînt magnetul permanent și bobina mobilă. Ele fac parte din *dispozitivul pentru producerea cuplului activ. Partea fixă* a acestui dispozitiv este alcătuită, așa cum se vede și în figura 3.1, din magnetul permanent *1*, piesele polare *2* și miezul cilindric *3*. Piesele polare și miezul sînt executate din fier moale și au suprafețele cilindrice, centrate pe axul aparatului astfel ca în întrefierul foarte îngust care se formează, cîmpul magnetic creat de magnetul permanent să aibă un spectru radial și uniform. Această distribuție a cîmpului în întrefier asigură obținerea unei scări liniare pentru aparatele magnetoelectrice. *Partea mobilă* este realizată dintr-o bobină *4*, așezată în întrefierul

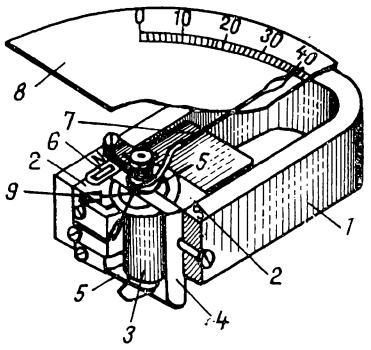


Fig. 3.1. Aparat magnetoelectric.

circuitului magnetic și montată pe două semiaxe ale căror capete se reazemă în lagăre.

De semiaxe sînt prinse două arcuri spirale *5* care creează *cuplul rezistent* și în același timp servesc la aducerea curentului la bobina mobilă. Capătul fix al unuia dintre arcuri este prins la șasiul aparatului, iar al celuilalt — la pîrghia *corectorului de zero 6*.

Pe una dintre semiaxe este fixat acul indicator *7* care împreună cu scara gradată *8* formează *dispozitivul de citire*.

Acul indicator este echilibrat de contragreutățile *9*. *Amortizorul* este electromagnetic și este format din carcasa bobinei, care se realizează din aluminiu, sau din cîteva spire în scurtcircuit prevăzute în acest scop pe bobină. La mișcarea bobinei în cîmpul magnetic al magnetului permanent, în carcasa din aluminiu sau în spirele în scurtcircuit se induc curenți a căror acțiune tinde să se opună mișcării, amortizînd în acest fel oscilațiile echipajului mobil.

3. FUNCȚIONAREA

La trecerea unui curent continuu I prin bobină, ca urmare a acțiunii curentului cu cîmpul magnetic al magnetului permanent, asupra părților active ale spirelor bobinei acționează forțele F care dau naștere cuplului activ M_a ce rotește bobina (fig. 3.2). După cum se știe din fizică, forța F ce se exercită asupra unui conductor de lungime l, parcurs de un curent de intensitate I și aflat într-un cîmp de inducție magnetică B este:

$$F = IBl.$$

Avînd în vedere că distanța între punctele de aplicație ale celor două forțe este b (lățimea unei spire) și că lungimea conductorului supus unei forțe F este egală cu înălțimea unei spire, l, înmulțită cu numărul de spire N ale bobinei, se poate deduce:

$$M_a = Fl = IBNbl = BNSI, \tag{3.1}$$

unde $S = bl$ este suprafața unei spire.

Bobina mobilă se rotește pînă cînd cuplul rezistent produs de

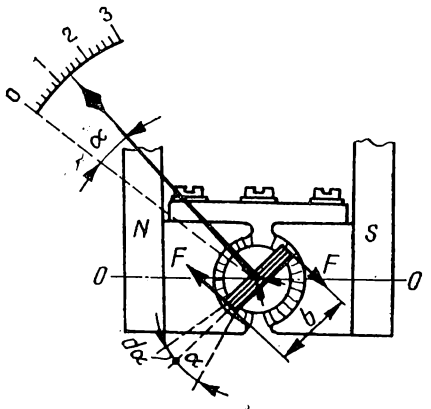


Fig. 3.2. Schema aparatului magnetoelectric.

arcurile spirale ($M_r = D\alpha$), crescînd cu unghiul de rotire, egalează cuplul activ ($M_a = M_r$). Înlocuind în această egalitate expresiile celor două cupluri, se obține:

$$BNSI = D\alpha,$$

de unde:

$$\alpha = \frac{BNS}{D} I \tag{3.2}$$

Avînd în vedere că prin construcția specială a circuitului magnetic se obține în întrefier o inducție constantă, se poata nota

$$\frac{B \cdot S \cdot N}{D} = K$$

și rezultă

$$\boxed{\alpha = K \cdot I} \tag{3.3}$$

Relația (3.3) reprezintă *caracteristica statică de funcționare a aparatelor magnetoelectrice.*

4. PROPRIETĂȚI

După cum reiese din expresia matematică a caracteristicii statice de funcționare, la aparatele magnetoelectrice indicația este proporțională cu intensitatea curentului ce se măsoară și deci aparatele magnetoelectrice *au scară uniformă.*

Sensibilitatea acestor aparate *este foarte mare,* realizîndu-se aparate care măsoară intensități ale curentului începînd de la microamperi și, în unele construcții speciale (galvanometre), chiar de ordinul nanoamperilor.

Precizia este foarte bună, putîndu-se ajunge la clase de precizie de 0,05—0,1.

Consumul propriu de putere este foarte mic, de obicei sub 1 mW.

Sînt puțin influențate de cîmpurile magnetice exterioare, întrucît cîmpul propriu, fiind concentrat în circuitul magnetic, este mult mai intens decît cîmpurile perturbatoare.

O proprietate deosebită a aparatelor magnetoelectrice este faptul că *funcționează numai în curent continuu.* În curent alternativ cuplul activ, care este proporțional cu curentul, devine și el alternativ, iar

echipajul mobil, neputînd urmări variațiile acestuia, rămîne pe loc sau vibrează puțin în jurul poziției de zero. Datorită faptului că aparatul nu indică valoarea intensității curentului ce trece prin bobina mobilă, există pericolul ca la depășirea curentului nominal aparatul să se deterioreze.

Aparatele magnetoelectrice *sînt sensibile la suprasarcini.*

5. UTILIZĂRI

Aparatele magnetoelectrice se folosesc ca ampermetre și voltmetre de curent continuu. Fiind cele mai bune aparate de măsurat electrice, ele se folosesc de asemenea ca instrumente indicatoare în foarte multe tipuri de aparate.

În țara noastră se construiesc diferite tipuri de aparate magnetoelectrice la „Întreprinderea de aparate de măsurat" din Timișoara.

B. MĂSURAREA INTENSITĂȚII CURENTULUI. AMPERMETRE

Intensitatea curentului electric este definită drept cantitatea de electricitate ce trece în unitatea de timp printr-o secțiune a unui circuit. Unitatea de măsură, amperul, este o unitate fundamentală a sistemului SI. În general, intensitatea curentului electric se măsoară prin *metode cu citire directă*, cu aparate indicatoare ce se numesc *ampermetre.*

Ampermetrele sînt aparate de măsurat a căror indicație depinde de intensitatea curentului electric ce trece prin ele:

$$\alpha = f(I) \tag{3.4}$$

Din caracteristica statică de funcționare a aparatelor magnetoelectrice

$$\alpha = K \cdot I$$

se observă că aceste aparate pot fi folosite ca ampermetre. Ampermetrele magnetoelectrice vor fi numai de curent continuu, deoarece aparatele magnetoelectrice funcționează numai în curent continuu.

1. MONTAREA AMPERMETRELOR ÎN CIRCUIT

Deoarece la ampermetre indicația depinde de intensitatea curentului ce le străbate, pentru a măsura intensitatea curentului într-un circuit *este necesar ca ampermetrul să fie montat în serie în circuitul respectiv,* pentru ca astfel curentul de măsurat să treacă prin aparat.

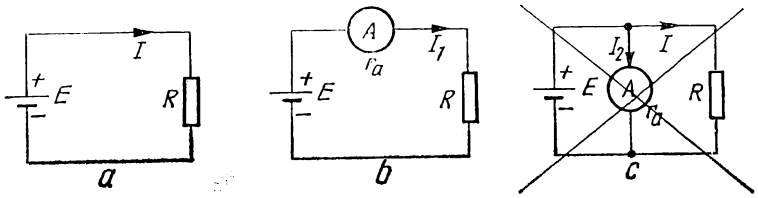


Fig. 3.3. Montarea ampermetrului în circuitul de măsurare:
a — circuitul fără ampermetru; *b* — circuitul cu ampermetru montat corect; *c* — circuit cu ampermetru montat greșit.

Orice circuit în care se măsoară intensitatea curentului poate fi redus la o schemă echivalentă care conține o sursă de tensiune E și o rezistență R (fig. 3.3, *a*). În acest caz, intensitatea curentului va fi:

$$I = \frac{E}{R}.$$

După montarea ampermetrului, în circuit intervine în serie și rezistența sa proprie r_a (fig. 3.3, *b*), iar intensitatea curentului va deveni:

$$I_1 = \frac{E}{R + r_a}.$$

Ca urmare, măsurarea va fi afectată de o eroare sistematică de metodă.

Pentru ca la montarea ampermetrului într-un circuit, funcționarea circuitului să se modifice cît mai puțin ($I_1 \cong I$), este necesar ca *rezistența proprie a ampermetrului să fie mult mai mică decît rezistența circuitului*, adică

$$r_a \ll R. \tag{3.5}$$

Exemplu. Într-un circuit alimentat la o sursă de tensiune $E = 3$ V și care conține o rezistență $R = 6\ \Omega$ se montează un ampermetru care are $r_a = 1\ \Omega$.

Înainte de montarea ampermetrului

$$I = \frac{E}{R} = \frac{3}{6} = 0{,}5 \text{ A}.$$

După montarea ampermetrului:

$$I_1 = \frac{E}{R + r_a} = \frac{3}{6 + 1} = 0{,}43 \text{ A}.$$

Prin montarea ampermetrului se introduce deci o eroare de măsurare

$$\varepsilon = I_1 - I = 0{,}43 - 0{,}5 = -0{,}07 \text{ A}.$$

Eroarea relativă, care indică calitatea măsurării, va fi:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{I} = \frac{0{,}07}{0{,}5} = 0{,}14 = 14\%.$$

Dacă rezistența ampermetrului ar fi $r_a = 0{,}1\ \Omega$, atunci:

$$I_1 = \frac{E}{R + r_a} = \frac{3}{6 + 0{,}1} = 0{,}492\ \text{A}.$$

Eroarea de măsurare în acest caz ar fi mult mai mică ($\varepsilon = 0{,}008$ A), iar eroarea relativă ar fi de numai 1,6%.

○ **Concluzie.** Cu cît rezistența ampermetrului este mai mică față de rezistența circuitului, cu atît erorile datorite acestei rezistențe sînt mai mici, deci calitatea măsurării este mai bună.

○ **Important!** *La montarea greșită a ampermetrului, în paralel pe circuit* (fig. 3.3, *c*), datorită rezistenței foarte mici a acestuia prin aparat va trece un curent cu o intensitate foarte mare:

$$I_2 = \frac{E}{r_a}.$$

Deoarece $r_a \ll R$, rezultă $I_2 \gg I$, ceea ce duce la deteriorarea ampermetrului.

Dacă se păstrează datele din exemplul precedent și se calculează I_2, se obține:

$$I_2 = \frac{E}{r_a} = \frac{3}{0{,}1} = 30\ \text{A}.$$

În acest caz, prin aparatul destinat să măsoare 0,5 A va trece un curent de 30 A și bobinajul ampermetrului se va arde.

Deoarece montarea în paralel a ampermetrului duce la defectarea acestuia, aceasta se consideră o greșeală foarte gravă în tehnica măsurărilor.

2. EXTINDEREA INTERVALULUI DE MĂSURARE LA AMPERMETRE

Orice aparat magnetoelectric este construit pentru un anumit interval de măsurare, caracterizat prin valoarea intensității curentului nominal I_a (valoarea de la capătul scării), și are o rezistență proprie r_a. Dacă este necesar să se măsoare un curent cu o intensitate $I > I_a$, se poate extinde intervalul de măsurare cu ajutorul unor dispozitive auxiliare numite *șunturi*.

Șuntul *este o rezistență electrică, de obicei de valoare mică, care se montează în paralel pe aparatul de măsurat și prin care trece o parte din curentul de măsurat.*

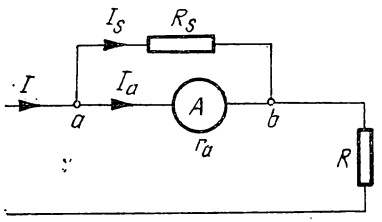


Fig. 3.4. Ampermetru cu şurub.

● Pentru **dimensionarea şunturilor** se consideră circuitul din figura 3.4. Notînd cu I intensitatea curentului de măsurat, cu $I_Ş$ şi $r_Ş$ intensitatea curentului ce trece prin şunt şi respectiv rezistenţa şuntului, cu I_a şi r_a intensitatea curentului ce trece prin aparat şi respectiv rezistenţa aparatului, tensiunea între punctele a, b va fi:

$$U_{ab} = I_a \cdot r_a = I_Ş \cdot r_Ş = I \cdot \frac{r_a \cdot r_Ş}{r_a + r_Ş}. \tag{3.6}$$

Aplicînd prima lege a lui Kirchhoff în punctul a, se poate scrie:

$$I = I_a + I_Ş. \tag{3.7}$$

Din relaţiile (3.6) şi (3.7) se poate deduce:

$$r_Ş = \frac{I_a \cdot r_a}{I_Ş}; \tag{3.8}$$

$$I_Ş = I - I_a.$$

Relaţiile (3.8) permit dimensionarea şuntului atunci cînd se cunosc caracteristicile aparatului magnetoelectric (I_a şi r_a) şi intensitatea I a curentului de măsurat.

Din relaţia (3.6) se mai pot deduce şi alte formule pentru dimensionarea şunturilor. Astfel, se poate scrie:

$$\frac{I}{I_a} = \frac{r_Ş + r_a}{r_Ş} = 1 + \frac{r_a}{r_Ş} = n,$$

în care n indică de cîte ori este mai mare curentul de măsurat decît curentul nominal şi se numeşte *coeficient de multiplicare* sau *factor de şuntare*.

Din relaţia:

$$n = 1 + \frac{r_a}{r_Ş}$$

se obţine:

$$\boxed{r_Ş = \frac{r_a}{n - 1}} \tag{3.9}$$

Relația (3.9) arată că pentru a extinde de n ori limita de măsurare a unui ampermetru, este necesar un șunt cu rezistența de $n - 1$ ori mai mică decît rezistența aparatului.

Exemplu. Să se determine rezistența unui șunt pentru un aparat magnetoelectric care are $I_a = 1$ mA și $r_a = 75\ \Omega$, pentru a putea măsura un curent cu intensitatea $I = 10$ mA.

$$n = \frac{I}{I_a} = \frac{10}{1} = 10;$$

$$r_\S = \frac{r_a}{n - 1} = \frac{75}{10 - 1} = 8{,}33\ \Omega.$$

● **Tipuri de șunturi.** Șunturile pot fi *interioare* (montate în aceeași cutie cu aparatul magnetoelectric) sau *exterioare*.

Șunturile exterioare pot fi *individuale*, adică pot fi folosite numai împreună cu aparatul cu care au fost etalonate (au marcată pe ele seria aparatului cu care trebuie să fie utilizate) sau *calibrate* (interschimbabile), care pot fi utilizate la orice aparat cu o anumită limită de măsurare. Pe aceste șunturi se marchează curentul nominal și căderea de tensiune nominală.

3. AMPERMETRE CU MAI MULTE INTERVALE DE MĂSURARE

În multe aplicații practice este necesar să se măsoare atît intensități mici ale curentului, cît și intensități mari. În acest caz se folosesc aparate cu șunturi pentru mai multe intervale de măsurare, care se schimbă cu ajutorul unui comutator.

Aparatele cu mai multe intervale de măsurare se pot realiza *cu mai multe șunturi*, cîte unul pentru fiecare domeniu de măsurare, sau *cu șunt universal*.

● Schema cea mai simplă pentru un **aparat cu mai multe șunturi** este reprezentată în figura 3.5. Această schemă are dezavantajul că în cazul în care comutatorul nu face contact perfect, prin aparatul de măsurat trece întregul curent, care poate distruge aparatul.

În figura 3.6 se arată *o schemă perfecționată*, care evită distrugerea aparatului. Comutatoarele K și K' sînt montate pe același ax, comutîndu-se simultan. Dacă unul dintre comutatoare nu asigură un contact

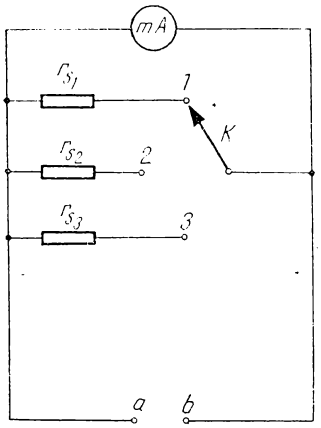


Fig. 3.5. Ampermetru cu mai multe șunturi cu un comutator.

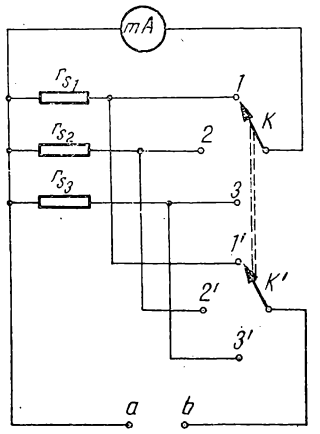


Fig. 3.6. Ampermetru cu mai multe șunturi cu două comutatoare.

bun, circuitul rămîne deschis și instrumentul indicator nu mai este în pericol.

● **Șuntul universal.** Șuntul universal, reprezentat în figura 3.7 este un ansamblu de rezistențe conectate între ele în serie, și care se distribuie fie în serie, fie în paralel cu aparatul de măsurat, în funcție de un comutator care schimbă intervalele de măsurare.

Astfel, pe poziția *1* a comutatorului întregul șunt cu rezistența totală $R_t = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ este în paralel cu aparatul; pe poziția *2* rezistența R_1 este în serie cu aparatul, rămînînd în paralel $R_2 + R_3 + R_4$; pe poziția *3*, R_1 și R_2 sînt în serie cu aparatul, iar în paralel rămîn numai R_3 și R_4, iar pe poziția *4* rămîne în paralel numai R_4.

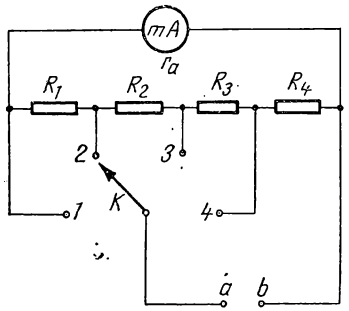


Fig. 3.7. Ampermetru cu șunt universal.

Rezistențele R_1, R_2, ..., R_n se pot dimensiona ușor. Pornind de la formula generală a șunturilor, $r_ș = \frac{r_a}{n-1}$, notînd pe fiecare poziție de ordin k coeficientul de multiplicare cu n_k și rezistențele care rămîn în paralel cu instrumentul indicator cu $R_{ș_k}$ și observînd că o

parte dintre rezistențe ($R_t - R_{ş_k}$) sînt în serie cu instrumentul indicator deci trebuie însumate cu r_a, se poate scrie:

$$R_{ş_k} = \frac{r_a + (R_t - R_{ş_k})}{n_k - 1};$$

$$R_{ş_k}(n_k - 1) = r_a + R_t - R_{ş_k},$$

de unde se deduce:

$$\boxed{R_{ş_k} = \frac{r_a + R_t}{n_k}} \tag{3.10}$$

Aplicînd această relație pentru diferite poziții ale comutatorului, se pot calcula valorile rezistențelor ce formează șuntul:

$$R_1 = R_t - \frac{r_a + R_t}{n_2};$$

$$R_2 = R_t - R_1 - \frac{r_a + R_t}{n_3}.$$

Rezistența de ordin k va fi:

$$R_k = R_t - R_1 - R_2 - \ldots - R_{k-1} - \frac{r_a + R_t}{n_{k+1}}. \tag{3.11}$$

Valoarea rezistenței R_t se poate determina aplicînd relația (3.10) pentru poziția *1* a comutatorului:

$$R_{ş1} = R_t = \frac{r_a + R_t}{n_1}$$

de unde se deduce:

$$R_1 = \frac{r_a}{n_1 - 1}.$$

În cazul particular $n_1 = 1$ se observă că $R_t = \infty$. În practică se alege pentru R_t o valoare mult mai mare decît r_a, de exemplu $R_t = 50r_a$.

Din relațiile (3.11) se observă că dacă rezistența totală a șuntului este mult mai mare decît rezistența aparatului, aceasta din urmă se poate neglija. În acest caz, relațiile nu mai depind de aparat și șuntul o dată calculat poate fi folosit la diferite aparate. Din acest motiv, acest tip de șunt se numește șunt universal.

C. MĂSURAREA TENSIUNILOR. VOLTMETRE

Tensiunea electrică este definită ca diferența de potențial electric dintre două puncte. Unitatea de măsură pentru tensiuni în sistemul SI este voltul, având ca simbol V.

În general, tensiunile electrice se măsoară prin *metode cu citire directă*, cu aparate gradate în volți, numite *voltmetre*. În măsurările de mare precizie se utilizează *metode de compensație*.

În capitolul 2 s-a arătat că aparatele magnetoelectrice au caracteristica statică de funcționare dependentă de intensitatea curentului ce trece prin ele, $\alpha = K \cdot I$, și că fiecare aparat se caracterizează printr-un curent nominal I_a și o rezistență proprie r_a.

La trecerea curentului electric printr-un aparat, conform legii lui Ohm, la bornele acestuia apare o cădere de tensiune

$$U = I \cdot r_a. \tag{3.12}$$

Din relația (3.12) se deduce:

$$I = \frac{U}{r_a}. \tag{3.13}$$

Dacă în caracteristica statică de funcționare se exprimă I prin $\frac{U}{r_a}$, se obține:

$$\alpha = f\left(\frac{U}{r_a}\right) = f_1(U). \tag{3.14}$$

Din această relație se observă că indicația α este funcție și de tensiunea de la bornele aparatului, deci acesta poate funcționa și ca voltmetru.

Dacă prin aparat trece un curent egal cu curentul său nominal, atunci indicația sa va fi maximă și tensiunea de la bornele sale va reprezenta *tensiunea nominală a aparatului:*

$$U_a = I_a \cdot r_a. \tag{3.15}$$

Deci, orice aparat de măsurat se caracterizează, pe lîngă curentul său nominal I_a și rezistența sa proprie r_a, și prin tensiunea sa nominală U_a.

Pentru ca un voltmetru să măsoare tensiunea electrică între două puncte ale unui circuit, el *trebuie montat în paralel pe circuit între cele două puncte,* astfel încît tensiunea de măsurat să fie egală cu tensiunea de la bornele sale.

Ca și în cazul ampermetrelor, la montarea voltmetrului în circuit este necesar ca funcționarea circuitului să se modifice cît mai puțin. În circuitul din figura 3.8, *a*, înainte de montarea voltmetrului, tensiunea între punctele *a*, *b* este:

$$U = \frac{RE}{R + r_i} = \frac{1}{1 + \frac{r_i}{R}} E.$$

După montarea voltmetrului (fig. 3.8, *b*), tensiunea între punctele *a*, *b* devine:

$$U_m = \frac{\frac{Rr_v}{R + r_v}}{r_i + \frac{Rr_v}{R + r_v}} E = \frac{E}{1 + \frac{r_i}{R} \cdot \frac{R + r_v}{r_v}}$$

Pentru ca $U \cong U_m$ este necesar ca raportul $\frac{R + r_v}{r_v}$ să fie aproximativ egal cu 1. Acest lucru este posibil numai dacă $r_v \gg R$ (în suma $R + r_v$, R să poată fi neglijat față de r_v).

○ **Concluzie.** Pentru ca la montarea voltmetrului în circuit, funcționarea acestuia să se modifice cît mai puțin, este necesar ca *rezistența voltmetrului să fie mult mai mare decît rezistența în paralel pe care se montează.*

○ **Important!** *La montarea greșită a voltmetrului, în serie cu circuitul* (fig. 3.8, *c*), datorită rezistenței foarte mari a acestuia curentul în circuit scade foarte mult.

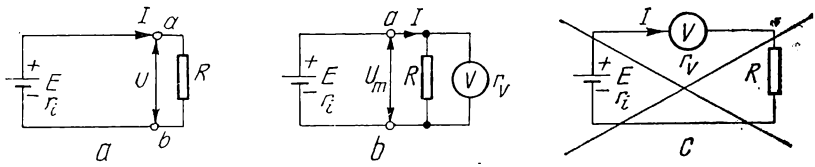


Fig. 3.8. Montarea voltmetrului în circuit:

a — circuitul fără voltmetru; *b* — circuitul cu voltmetru montat corect; *c* — circuitul cu voltmetru montat greșit.

De obicei, căderea de tensiune nominală la bornele aparatelor magnetoelectrice este foarte mică, sub un volt. Cînd tensiunea de măsurat U este mai mare decît tensiunea nominală a aparatului, se poate extinde intervalul de măsurare cu ajutorul unor dispozitive numite *rezistențe adiționale.*

Rezistența adițională *este o rezistență de valoare mare, care se montează în serie cu aparatul magnetoelectric și pe care cade o parte din tensiunea de măsurat.*

● Pentru **dimensionarea rezistențelor adiționale** se consideră circuitul din figura 3.9. Se observă că atît prin instrumentul de măsurat, cît și prin rezistența adițională, trece același curent, I_a:

$$I_a = \frac{U_a}{r_a} = \frac{U}{r_a + r_{ad}}. \tag{3.16}$$

Din această relație se poate deduce:

$$\frac{U}{U_a} = \frac{r_a + r_{ad}}{r_a} = 1 + \frac{r_{ad}}{r_a} = n, \tag{3.17}$$

în care n indică de cîte ori tensiunea de măsurat este mai mare decît tensiunea nominală și se numește *coeficient de multiplicare.*

Din relația:

$$n = 1 + \frac{r_{ad}}{r_a}$$

se obține:

$$\boxed{r_{ad} = r_a(n - 1)} \tag{3.18}$$

Deci, pentru a extinde de n ori intervalul de măsurare al unui voltmetru, este necesară o rezistență adițională de $n - 1$ ori mai mare decît rezistența aparatului magnetoelectric.

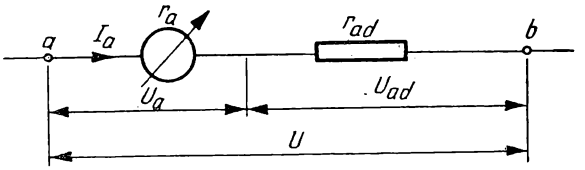


Fig. 3.9. Voltmetru cu rezistență adițională.

Exemplu. Un aparat magnetoelectric are $I_a = 1$ mA și $r_a = 100\ \Omega$. Să se determine rezistența adițională necesară pentru a putea măsura o tensiune $U = 10$ V.

$$U_a = I_a \cdot r_a = 0{,}001 \cdot 100 = 0{,}1\ \text{V};$$

$$n = \frac{U}{U_a} = \frac{10}{0{,}1} = 100;$$

$$r_{ad} = r_a(n - 1) = 100(100 - 1) = 9\,900\ \Omega.$$

Rezistența totală a voltmetrului este:

$$r_v = r_a + r_{ad} = 100 + 9\,900 = 10\,000\ \Omega.$$

După cum se vede în exemplul de mai sus, rezistența adițională este mult mai mare decît rezistența aparatului. De aceea, în relația $U = I_a\,(r_a + r_{ad})$ se poate neglija r_a și se obține:

$$U = I_a \cdot r_{ad};$$

$$r_{ad} = \frac{U}{I_a}. \tag{3.19}$$

Relația 3.19 arată că rezistența adițională este proporțională cu tensiunea de măsurat și valoarea ei depinde de curentul nominal al aparatului magnetoelectric.

● **Rezistența în ohm pe volt.** Aparatele utilizate ca voltmetre sînt caracterizate adesea prin rezistența necesară pentru a extinde domeniul de măsurare cu un volt, cunoscută sub denumirea de „rezistență în Ω/V".

În relația (3.19), dacă se consideră $U = 1$ V, se obține:

$$\boxed{R\,[\Omega/\text{V}] = \frac{1}{I_a}} \tag{3.20}$$

Relația (3.20) arată că *rezistența în ohm pe volt ce caracterizează un aparat este inversul curentului său nominal.*

Exemple. Un aparat avînd $I_a = 1$ mA, are 1 000 Ω/V.

Un voltmetru care are 50 000 Ω/V, folosește un instrument de măsurat avînd curentul nominal $I_a = 20\ \mu$A.

Rezistența adițională pentru un anumit interval de măsurare se va obține înmulțind rezistența în ohm pe volt cu tensiunea corespunzătoare intervalului respectiv:

$$r_{ad} = U\,\frac{1}{I_a} = \frac{U}{I_a}. \tag{3.21}$$

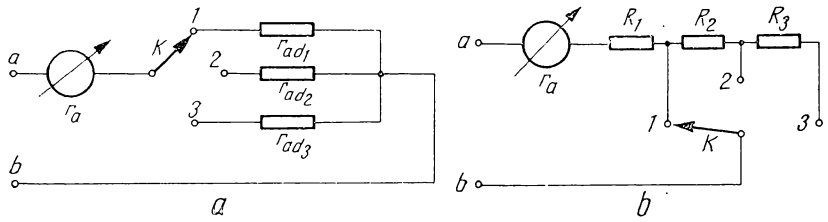


Fig. 3.10. Voltmetru cu mai multe intervale de măsurare:
a — cu cîte o rezistență adițională pentru fiecare interval; *b* — cu rezistențe în serie.

Exemplu. Un aparat cu 10 000 Ω/V, pentru un interval de măsurare de 10 V are nevoie de o rezistență adițională de 100 000 Ω.

Avînd în vedere că voltmetrele trebuie să îndeplinească condiția $r_v \gg R$, *cu cît un voltmetru are rezistența în ohm pe volt mai mare, cu atît el este mai bun.* Cele mai bune voltmetre care se construiesc în prezent folosesc aparate magnetoelectrice avînd curentul nominal de 10 μA, adică o rezistență de 100 000 Ω/V.

3. VOLTMETRE CU MAI MULTE INTERVALE DE MĂSURARE

Unele voltmetre portative sînt prevăzute cu rezistențe adiționale pentru mai multe intervale de măsurare, ce se schimbă cu ajutorul unui comutator. Rezistențele adiționale pot fi realizate separat, cîte una pentru fiecare interval de măsurare, sau pot fi formate din mai multe rezistențe legate în serie (fig. 3.10, *a* și 3.10, *b*). Pentru cel de-al doilea caz:

$$r_{ad_1} = R_1;$$

$$r_{ad_2} = R_1 + R_2;$$

$$r_{ad_k} = R_1 + R_2 + \ldots + R_k. \qquad (3.22)$$

D. MĂSURAREA REZISTENȚELOR ELECTRICE

Rezistența electrică este o mărime egală cu raportul între tensiunea electrică aplicată între capetele unui conductor și intensitatea curentului produs de această tensiune în conductorul respectiv.

Unitatea de măsură pentru rezistența electrică în sistemul SI este ohmul, avînd ca simbol Ω:

$$1\ \Omega = \frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}}\cdot \tag{3.23}$$

În circuitele electrice folosite în practică se întîlnesc rezistențe electrice într-o mare varietate constructivă și cu o gamă largă de valori, ceea ce a condus la un mare număr de **metode de măsurat.** Dintre acestea, cele mai folosite sînt:

— *metoda indirectă a ampermetrului și voltmetrului,* cu variantele amonte și aval;

— *metode de comparație,* dintre care

— metoda substituției;

— metoda comparării tensiunilor;

— metoda reducerii tensiunii la jumătate;

— metode de punte;

— *metode cu citire directă,* folosind ohmmetre și megohmmetre.

1. METODA AMPERMETRULUI ȘI VOLTMETRULUI

Metoda ampermetrului și voltmetrului este o metodă indirectă: se măsoară tensiunea la bornele rezistenței cu voltmetrul și intensitatea curentului ce trece prin rezistență, cu ampermetrul; valoarea rezistenței de măsurat se obține aplicînd legea lui Ohm:

$$R = \frac{U}{I}\cdot$$

Deoarece se folosesc două aparate de măsurat, se pune problema poziționării lor reciproce. Este posibil să se realizeze două variante (fig. 3.11), care diferă între ele prin poziția voltmetrului față de amper-

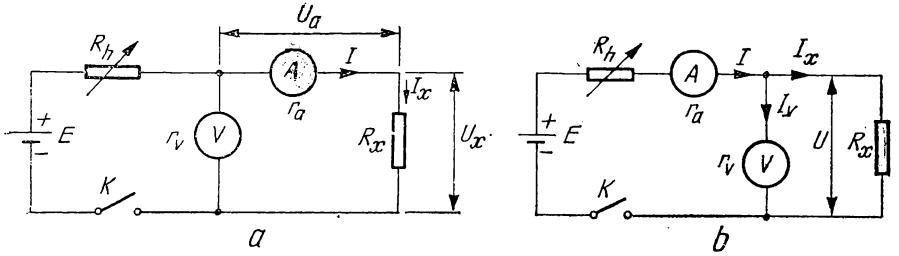


Fig. 3.11. Măsurarea rezistențelor prin metoda ampermetrului și voltmetrului: *a* — varianta amonte; *b* — varianta aval.

metru. Împrumutînd termeni din navigația fluvială, se spune că în figura 3.11, *a* voltmetrul este în amonte față de ampermetru, iar în figura 3.11, *b* voltmetrul este în aval față de ampermetru. Oricare variantă se alege, se constată că se introduc erori sistematice de metodă. Important este să se știe în ce condiții aceste erori sînt minime. Pentru aceasta se vor analiza cele două variante pe rînd.

● **Varianta amonte** (fig. 3.11, *a*). Cu montajul din figura 3.11, *a* trebuie să se măsoare valoarea rezistenței R_x:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x}.$$

Ampermetrul măsoară $I = I_x$.

Voltmetrul măsoară $U = U_a + U_x$, unde $U_a = I \cdot r_a$, r_a fiind rezistența ampermetrului.

Cu datele obținute, aplicînd legea lui Ohm, se calculează:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_a + U_x}{I} = r_a + R_x.$$

Se observă că în această variantă se introduce o eroare sistematică de metodă

$$\varepsilon = R - R_x = r_a.$$

Eroarea relativă, care indică precizia măsurării, va fi:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{R_x} = \frac{r_a}{R_x}.$$

Pentru a obține o precizie cît mai mare, este necesar ca eroarea relativă să fie cît mai mică, deci

$$r_a \ll R_x.$$

○ **Concluzie.** *Varianta amonte se va folosi numai pentru măsurarea rezistențelor mari, mult mai mari decît rezistența ampermetrului.*

● **Varianta aval** (fig. 3.11, *a*). Cu montajul din figura 3.11, *b* trebuie să se măsoare valoarea rezistenței R_x.

Ampermetrul măsoară $I = I_x + I_v$, unde I_v este curentul prin voltmetru $\left(I_v = \frac{U}{r_v}\right)$, r_v fiind rezistența voltmetrului.

Voltmetrul măsoară $U = U_x$.

Cu datele obținute, aplicînd legea lui Ohm, se calculează:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_x + I_v} = \frac{\frac{U}{I_x}}{1 + \frac{I_v}{I_x}} = \frac{R_x}{1 + \frac{I_v}{I_x} \cdot \frac{U}{U}} = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{r_v}}.$$

Și în acest caz se introduce o eroare sistematică de metodă:

$$\varepsilon = R - R_x = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{r_v}} - R_x = R_x \left(\frac{1}{1 + \frac{R_x}{r_v}} - 1 \right).$$

Eroarea relativă va fi:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{R_x} = \frac{1}{1 + \frac{R_x}{r_v}} - 1.$$

Pentru a obține o precizie cît mai mare, eroarea relativă trebuie să fie cît mai mică, deci $r_v \gg R_x$.

○ **Concluzie.** *Varianta aval se va folosi numai pentru măsurarea rezistențelor mici, mult mai mici decît rezistența voltmetrului.*

Metoda ampermetrului și voltmetrului are avantajul că permite măsurarea rezistențelor sub curentul lor nominal, care se poate regla cu rezistența variabilă R_h.

2. METODE DE COMPARAȚIE

În metodele de comparație, valoarea rezistenței de măsurat se compară cu valoarea unor rezistențe cunoscute. Dintre metodele de comparație se vor studia: metoda substituției, metoda comparării tensiunilor, metoda reducerii tensiunii la jumătate și metoda de puncte.

a. Metoda substituției

La măsurarea rezistențelor prin metoda substituției se folosește montajul din figura 3.12, în care:

E este o sursă de curent continuu cu rezistență internă neglijabilă;
R_0 — rezistență variabilă etalonată;
K — comutator cu două poziții;
A — ampermetru cu mai multe limite de măsurare.

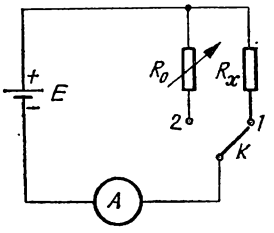


Fig. 3.12. Măsurarea rezistențelor prin metoda substituției.

Modul de lucru:

— se închide comutatorul K pe poziția *1* și se măsoară

$$I_1 = \frac{E}{R_x};$$

— se trece comutatorul K pe poziția *2* și se măsoară

$$I_2 = \frac{E}{R_0};$$

— se variază R_0 pînă cînd $I_2 = I_1$:

$$\frac{E}{R_x} = \frac{E}{R_0};$$

rezultă

$$R_x = R_0.$$

○ **Concluzii.** Metoda substituției este simplă și rapidă. Se pot măsura atît rezistențe mari cît și rezistențe mici, comparabile cu R_0. Necesită însă o rezistență variabilă etalonată. Precizia metodei depinde de precizia rezistenței variabile și de precizia ampermetrului utilizat.

b. Metoda comparării tensiunilor

În metoda comparării tensiunilor rezistența de măsurat R_x se compară cu o rezistență fixă R_0. Se folosește montajul din figura 3.13, în care:

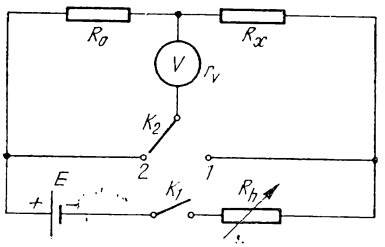


Fig. 3.13. Măsurarea rezistențelor prin metoda comparației.

E este o sursă de curent continuu de rezistență internă neglijabilă;

R_0 — rezistență fizică de valoare cunoscută;

K_1 — întrerupător;

K_2 — comutator cu două poziții;

V — voltmetru cu rezistență de intrare mare;

R_h — rezistență variabilă pentru reglarea intensității curentului.

Modul de lucru:

— se închide comutatorul K_1;

— se așază comutatorul K_2 pe poziția *1* și se măsoară

$$U_1 = I \cdot R_x;$$

— se trece comutatorul K_2 pe poziția *2* și se măsoară

$$U_2 = I \cdot R_0.$$

Împărțind aceste relații între ele se obține

$$\frac{U_1}{U_2} \frac{R_x}{R_0} \text{ și rezultă } R_x = \frac{U_1}{U_2} R_0.$$

○ **Concluzii.** Metoda se folosește pentru a măsura rezistențe mici în comparație cu rezistența voltmetrului. În acest caz, cele două rezistențe, R_0 și R_x, se pot considera în serie și deci sînt străbătute de același curent.

c. Metoda reducerii tensiunii la jumătate

Metoda reducerii tensiunii la jumătate este o metodă simplă și rapidă, mult utilizată în practică. Se folosește montajul din figura 3.14, în care:

E este o sursă de curent continuu de rezistență internă neglijabilă;

R_0 — rezistență variabilă etalonată;

V — voltmetru cu rezistență de intrare mare față de R_x;

K — întrerupător.

Modul de lucru:

— se închide întrerupătorul K și se măsoară tensiunea U_1 la bornele rezistenței R_x. În acest caz $U_1 = E$;

— se deschide întrerupătorul K, introducîndu-se în circuit și rezistența R_0. Se măsoară din nou tensiunea pe rezistența R_x. De această dată, curentul prin circuit va fi:

$$I = \frac{E}{R_x + R_0},$$

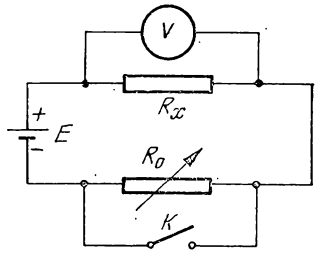


Fig. 3.14. Măsurarea rezistențelor prin metoda reducerii tensiunii la jumătate.

iar tensiunea U_2 la bornele rezistenței R_x va fi:

$$U_2 = IR_x = \frac{ER_x}{R_x + R_0}.$$

Făcînd raportul între cele două tensiuni se obține

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_x + R_0}{R_x}.$$

Dacă se variază R_0 pînă cînd $U_2 = \frac{U_1}{2}$:

$$\frac{R_x + R_0}{R_x} = 2;\ R_x + R_0 = 2R_x \text{ și rezultă } R_x = R_0.$$

Deci, cînd tensiunea scade la jumătate, rezistența de măsurat este egală cu rezistența variabilă R_0.

d. **Metode de punte**

Puntea este un circuit tipic care conține patru elemente (brațe) dispuse într-o schemă sub forma unui patrulater (fig. 3.15). Circuitul se alimentează pe una dintre diagonalele patrulaterului, iar în cealaltă diagonală se montează un aparat indicator de nul. Cînd indicatorul de nul arată zero, între cele patru elemente ce formează puntea există o relație bine determinată, din care, cunoscînd valorile a trei elemente ale punții, se deduce valoarea celui de-al patrulea.

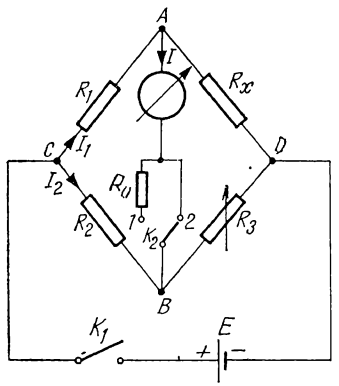


Fig. 3.15. Puntea Wheatstone.

Măsurarea rezistențelor cu metode de punte prezintă următoarele *avantaje:*

— sensibilitate mare;
— precizie mare;
— domeniu larg de utilizare;
— manevrare ușoară.

Există diferite tipuri de punți de măsurare. Cea mai răspîndită este puntea simplă cunoscută sub numele de *punte Wheatstone.*

● **Schema de principiu a punților Wheatstone** este reprezentată în figura 3.15, în care:

R_x este rezistența de măsurat;
R_3 — o rezistență variabilă în decade;
R_1, R_2 sînt rezistențe cunoscute;
E este o sursă de curent continuu;
K_1, K_2 sînt întrerupătoare;
G este un galvanometru (aparat magnetoelectric de mare sensibilitate cu zero la mijloc).

● **Funcționarea.** Rezistența de măsurat R_x se montează la bornele de măsurare ale punții și se închid întrerupătoarele K_1 și K_2.

Se variază rezistența R_3 pînă cînd galvanometrul indică zero. În acest caz, punctele A și B vor fi la același potențial. Acest lucru este posibil numai dacă

$$U_{CA} = U_{CB}; \qquad (3.24)$$
$$U_{DA} = U_{DB}.$$

Aplicînd legea lui Ohm pe cele patru brațe și observînd că prin R_1 și R_x trece același curent I_1 (prin diagonala în care este montat galvanometrul nu se ramifică curent), iar prin R_2 și R_3 trece același curent I_2, se poate scrie:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2; \qquad (3.25)$$
$$I_1 R_x = I_2 R_3.$$

Împărțind cele două relații între ele se obține:

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3} \text{ sau } R_1 \cdot R_x = R_2 \cdot R_3 \qquad (3.26)$$

Aceste relații, care leagă între ele cele patru elemente ale unei punți cînd prin diagonala în care se află galvanometrul curentul este zero, reprezintă *condiția de echilibru a punții*. Aceasta se poate exprima astfel:

> La o punte în echilibru produsele brațelor opuse sînt egale.

sau:

> La o punte în echilibru rapoartele brațelor alăturate sînt egale.

Din condiția de echilibru, cunoscînd trei elemente ale punții se deduce al patrulea

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1}. \tag{3.27}$$

Deci R_x se compară cu rezistențele R_1, R_2, R_3 de valori cunoscute.

De obicei, rezistențele R_1 și R_2 pot lua valori de 10 Ω, 100 Ω sau 1 000 Ω, astfel încît raportul R_2/R_1 să reprezinte un factor de multiplicare pentru rezistența R_3. Precizia maximă se obține pentru raportul $R_2/R_1 = 1$.

● **Protecția galvanometrului.** Deoarece la începutul măsurării puntea poate să fie mult dezechilibrată, trebuie să se micșoreze sensibilitatea galvanometrului pentru a nu fi deteriorat la trecerea unui curent prea mare prin el. În acest scop, galvanometrul se protejează cu o rezistență care se poate introduce în serie prin intermediul comutatorului K_2.

La începutul măsurării comutatorul K_2 este pe poziția *1* și introduce în serie cu galvanometrul rezistența de protecție R_a, ceea ce duce la scăderea sensibilității. Cînd echilibrul punții a fost aproximativ atins, se trece comutatorul K_2 pe poziția *2* și se continuă echilibrarea cu o sensiblitate sporită.

Metodele de puncte sînt cele mai sensibile și mai precise metode folosite la măsurarea rezistențelor electrice. La noi în țară se construiesc punți Wheatstone la Institutul Național de Metrologie din București.

3. OHMMETRE ȘI MEGOHMMETRE

Ohmmetrele sînt aparate cu citire directă folosite la măsurarea rezistențelor electrice. Funcționarea lor se bazează pe legea lui Ohm. Există o mare varietate de scheme constructive, dar în general ele se pot reduce la două variante:

— *ohmmetre serie;*
— *ohmmetre derivație.*

a. Ohmmetrul serie

Ohmmetrul serie se caracterizează prin faptul că toate elementele sale sînt conectate în serie.

● **Schema** unui astfel de aparat este reprezentată în figura 3.16, în care:

E este o baterie de curent continuu (1,5 ... 18) V, cu rezistență r_i;
R — rezistență fixă, pentru limitarea curentului;
R_1 — rezistență variabilă;
mA — miliampermetru magnetoelectric, cu rezistența r_a;
A, B sînt bornele la care se montează rezistența de măsurat R_x.

● **Funcționarea.** La montarea unei rezistențe R_x între bornele A, B, intensitatea curentului în circuitul ohmmetrului va fi:

$$I = \frac{E}{r_i + r_a + R_1 + R + R_x}. \tag{3.28}$$

Valorile extreme se vor obține pentru $R_x = 0$ și $R_x = \infty$.

În cazul $R_x = 0$ (bornele A, B în scurtcircuit):

$$I = \frac{E}{r_i + r_a + R_1 + R}.$$

Aceasta este cea mai mare valoare pe care o poate avea intensitatea curentului. Pentru a folosi întreaga scară a miliamperului, se reglează R_1 astfel încît $I = I_{max}$ (indicația să fie la capătul scării).

În cazul $R_x = \infty$ (bornele A, B în gol):

$$I = \frac{E}{\infty} = 0.$$

Pentru valori ale lui R_x cuprinse între 0 și ∞, intensitatea curentului va varia între I_{max} și 0, conform relației (3.28).

Dacă se trasează pe cadranul miliampermetrului reperele corespunzătoare diferitelor valori ale lui R_x, se constată că *scara gradată a ohmmetrului este inversă și foarte neuniformă* (fig. 3.17).

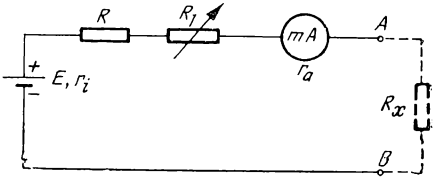


Fig. 3.16. Ohmmetru serie.

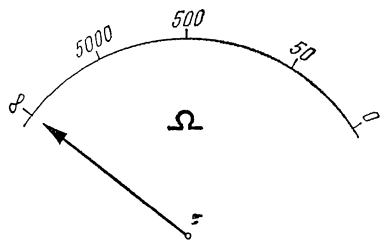


Fig. 3.17. Scara gradată a unui ohmmetru serie.

Ohmmetrul serie se folosește pentru *măsurarea rezistențelor mari*, comparabile cu suma $R + R_1$, obținîndu-se o precizie bună în domeniul

$$0{,}1(R + R_1) < R_x < 10(R + R_1)$$

Schimbînd rezistențele R și R_1 și, corespunzător, șunturile miliampermetrului, se pot realiza ohmmetre serie cu mai multe domenii de măsurare ($\times 1$; $\times 10$; $\times 100$).

● **Reglarea ohmmetrelor serie.** O problemă deosebită pe care o prezintă ohmmetrele este determinată de alimentarea lor de la baterii chimice. Acestea cu timpul îmbătrînesc (își măresc rezistența internă r_i), ceea ce duce la indicații eronate. Pentru a evita înrăutățirea preciziei măsurării, înainte de utilizare este necesar să se regleze indicația corespunzătoare pentru $R_x = 0$, făcînd scurtcircuit între bornele A, B. Dacă acul indicator nu indică 0 Ω, se va regla rezistența R_1 pînă cînd se obține indicația corectă (variația rezistenței R_1 compensează variația rezistenței r_i).

Indicația corespunzătoare valorii $R_x = \infty$ (bornele A, B în gol) se reglează cu ajutorul corectorului de zero al aparatului magnetoelectric.

b. Ohmmetrul derivație

Ohmmetrul derivație se caracterizează prin faptul că miliampermetrul este montat în derivație cu porțiunea de circuit A, B supusă măsurării.

● **Schema** unui astfel de aparat este reprezentată în figura 3.18, în care:

E este o baterie de curent continuu (1,5 ... 18)V cu rezistență r_i;

R — rezistență fixă pentru limitarea intensității curentului;

R_1 — rezistență variabilă;

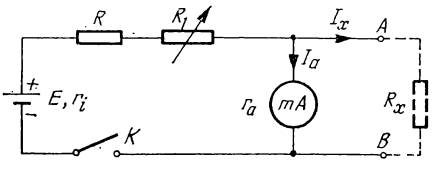
mA — miliampermetru magnetoelectric cu rezistență r_a;

A, B sînt bornele la care se montează rezistența de măsurat R_x;

K este întrerupător, pentru întreruperea circuitului cînd ohmmetrul nu funcționează.

● **Funcționarea.** După închiderea întrerupătorului K, la montarea unei rezistențe la bornele A, B, curentul debitat de sursa E se distribuie

Fig. 3.18. Ohmmetru derivație.



prin miliampermetru și prin R_x, cu valori invers proporționale cu rezistențele r_a și R_x:

$$\frac{I_a}{I_x} = \frac{R_x}{r_a}. \tag{3.29}$$

Intensitatea curentului prin miliampermetru, I_a, va fi:
— pentru $R_x = 0$ (bornele A, B în scurtcircuit):
$I_a = 0$ (curentul va prefera calea prin $R_x = 0$);
— pentru $R_x = \infty$ (bornele A, B în gol):

$$I_a = \frac{E}{r_i + r_a + R + R_1}.$$

Aceasta este cea mai mare valoare pe care o poate lua intensitatea curentului prin miliampermetru. Pentru a folosi întreaga scară a miliampermetrului, se reglează R_1 astfel încît $I_a = I_{max}$.

Pentru valori ale lui R_x cuprinse între 0 și ∞, intensitatea curentului va varia între zero și I_{max} conform relației (3.29).

Dacă se trasează pe cadranul miliampermetrului reperele corespunzătoare diferitelor valori ale lui R_x, se constată că de această dată *scara nu mai este inversă, dar rămîne foarte neuniformă* (fig. 3.19).

Ohmmetrul derivație *măsoară valori mici ale rezistențelor*, comparabile cu r_a, obținîndu-se o precizie bună în domeniul

$$0{,}1\, r_a < R_x < 10\, r_a.$$

● **Reglarea ohmmetrului derivație.** Și la ohmmetrele derivație intervine aceeași problemă a îmbătrînirii bateriilor chimice. De aceea, înainte de folosire este necesară reglarea ohmmetrului. Reglarea se face pentru $R_x = \infty$ (lăsînd bornele A, B în gol), variind rezistența R_1 pînă se obține indicația corectă. Indicația corespunzătoare valorii $R_x = 0$ se reglează din corectorul de zero al aparatului magnetoelectric.

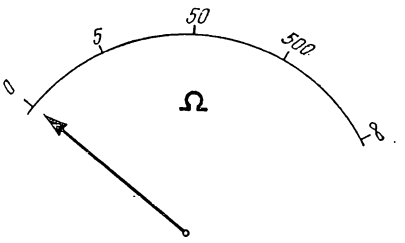


Fig. 3.19. Scara gradată a unui ohmmetru derivație.

c. Megohmmetre

Megohmmetrele sînt aparate cu citire directă destinate să măsoare rezistențe foarte mari, de ordinul megohmilor. Ele funcționează pe același principiu ca ohmmetrele, cu deosebirea că sînt alimentate la tensiuni mult mai mari, de ordinul sutelor sau miilor de volți.

● **Sursele de alimentare** cele mai frecvent folosite sînt *magnetoul* și *alimentatorul cu convertor tranzistorizat.*

Magnetoul este un mic generator de curent continuu, alcătuit dintr-un magnet permanent și o bobină care se rotește între polii acestuia, acționată de o manivelă.

Alimentatorul cu convertor tranzistorizat este un dispozitiv alimentat la o tensiune continuă de cîțiva volți obținută de la baterii chimice și care dă la ieșirea sa o tensiune continuă de sute sau mii de volți necesară alimentării megohmmetrului. El funcționează astfel: tensiunea mică de la bateriile chimice alimentează un oscilator tranzistorizat care transformă tensiunea continuă în tensiune alternativă. Valoarea acesteia se poate mări cu ajutorul unui transformator pînă la valoarea dorită, după care se redresează obținîndu-se tensiune continuă de valoare mare.

● Ca **instrument indicator** la megohmmetre se folosesc aparate magnetoelectrice sau logometre magnetoelectrice.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Ce se întîmplă dacă se montează un aparat magnetoelectric într-un circuit străbătut de curent alternativ?
2. Cum trebuie montat ampermetrul în circuit? Dar voltmetrul? Ce se întîmplă la montarea lor greșită?
3. Ce metode se folosesc la măsurarea rezistențelor mici? Dar la măsurarea rezistențelor mari?
4. De ce trebuie protejat galvanometrul la punțile de măsurat?
5. De ce este necesară reglarea ohmmetrelor înainte de utilizare? În cazul unor indicații incorecte, cum se realizează reglajele necesare?

Capitolul 4

APARATE DE MĂSURAT PENTRU CURENT ALTERNATIV DE JOASĂ FRECVENȚĂ

A. APARATE FEROMAGNETICE

Aparatele feromagnetice mai sînt cunoscute și sub denumirea de aparate electromagnetice sau aparate cu fier mobil.

1 PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Aparatele feromagnetice funcționează pe baza acțiunii cîmpului magnetic al unei bobine fixe parcurse de curentul de măsurat, asupra unor plăcuțe din material feromagnetic, care sînt atrase sau respinse în interiorul bobinei.

2. DESCRIEREA APARATULUI

Așa cum s-a menționat în principiul de funcționare, pot exista două variante constructive: *cu atracție* și *cu respingere*.

● **Aparatul feromagnetic cu atracție** (fig. 4.1) are *dispozitivul pentru producerea cuplului activ* compus dintr-o bobină fixă *1*, plată, în interiorul căreia, la trecerea curentului prin bobină, este atrasă o piesă *2* din material feromagnetic, așezată excentric pe axul *3* al echipajului mobil. *Cuplul rezistent* este produs de un singur arc spiral *6*, care are un capăt fixat pe axul echipajului mobil, iar pe celălalt — *la corectorul de zero, 7*. Odată cu echipajul mobil se deplasează și acul indicator *4* care, împreună cu scara gradată, formează *dispozitivul de citire*. *Amortizorul 8* este pneumatic cu paletă.

● **Aparatul feromagnetic cu respingere** (fig. 4.2) are *dispozitivul pentru producerea cuplului activ* compus dintr-o bobină fixă *1*, de formă

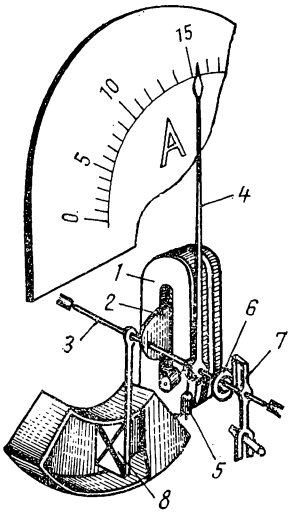


Fig. 4.1. Aparat feromagnetic cu atracție.

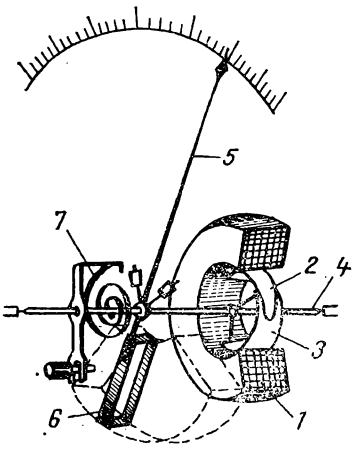


Fig. 4.2. Aparat feromagnetic cu respingere.

cilindrică, și din două plăcuțe din material feromagnetic dintre care o plăcuță *2* este fixată pe bobină, iar cealaltă (*3*) este fixată pe axul *4* al echipajului mobil. La trecerea curentului prin bobină, cele două plăcuțe se magnetizează și se resping între ele, dînd naștere cuplului activ care pune în mișcare echipajul mobil. *Cuplul rezistent* este produs de arcul spiral *7*, care are un capăt montat la *corectorul de zero*. Acul indicator *5* fixat pe axul echipajului mobil, împreună cu scara gradată, formează *dispozitivul de citire*. *Amortizorul 6* este cu paletă.

3. FUNCȚIONAREA

La trecerea curentului electric prin bobină, piesele din material feromagnetic se magnetizează și sînt atrase sau respinse în interiorul bobinei.

● **Cuplul activ** care ia naștere și care pune în mișcare echipajul mobil, este proporțional cu pătratul intensității curentului ce trece prin bobină:

$$M_a = kI^2. \tag{4.1}$$

● **Cuplul rezistent** creat de arcul spiral crește proporțional cu unghiul de deviație, α ($M_r = D\alpha$).

● La un moment dat, cuplul rezistent devine egal cu cuplul activ, obținîndu-se starea de echilibru ($M_a = M_r$). Înlocuind în ecuația de echilibru expresiile celor două cupluri, rezultă:

$$kI^2 = D\alpha;$$

$$\alpha = \frac{k}{D} I^2.$$

Notînd $\frac{k}{D} = K$, se obține **caracteristica statică de funcționare** a aparatelor feromagnetice:

$$\boxed{\alpha = KI^2} \qquad (4.2)$$

4. PROPRIETĂȚI

După cum arată ecuația caracteristicii statice de funcționare, aparatele feromagnetice *nu au scară uniformă*. Dacă K ar fi independent de α, s-ar obține o scară pătratică. În practică însă, prin soluții constructive convenabile (alegînd adecvat dimensiunile și forma pieselor componente) se poate face ca factorul K să scadă cînd α crește, compensînd în acest mod neliniaritatea scării. Se realizează o scară aproape uniformă, cu excepția primelor repere.

Sensibilitatea este mică, putîndu-se măsura intensități ale curentului începînd de la zeci de miliamperi.

Precizia aparatelor feromagnetice este mică. De obicei ele sînt de clasa 1,5—2,5. Folosirea aliajelor magnetice speciale, de exemplu permaloy, permite obținerea unor clase de precizie superioare (începînd cu clasa 0,5).

Consumul propriu de putere este mare (0,5—7,5 VA).

Aparatele feromagnetice *funcționează atît în curent continuu, cît și în curent alternativ*. În curent alternativ, odată cu schimbarea sensului curentului schimbîndu-se atît direcția fluxului magnetic cît și polaritatea magnetizării pieselor feromagnetice, cuplul activ acționează tot timpul în același sens.

Indicațiile *sînt influențate de fenomenul de histerezis și de curenții turbionari*. În curent continuu, datorită fenomenului de histerezis aparatele dau indicații diferite pentru aceleași valori crescătoare și descrescătoare ale intensității curentului. În curent alternativ, datorită curenților turbionari ce se induc în piesele feromagnetice, care au o acțiune demagnetizantă, indicațiile sînt mai mici decît în curent continuu

cu 1—2%. Întrucît erorile cresc cu frecvența, aceste aparate nu se folosesc decît pînă la cîteva sute de herți.

Aparatele feromagnetice *sînt influențate de cîmpurile magnetice exterioare*, deoarece cîmpul magnetic propriu este relativ redus. Pentru a înlătura acest dezavantaj, aparatele se ecranează sau se construiesc aparate astatice. Un aparat feromagnetic astatic este format din două bobine conectate în serie, ale căror cîmpuri magnetice sînt egale, dar de sens contrar. Cîmpurile exterioare întăresc cîmpul unei bobine și slăbesc cîmpul celeilalte, obținîndu-se un efect total nul.

○ **Concluzie.** Aparatele feromagnetice au performanțe relativ slabe. În schimb sînt robuste, simple și au preț de cost redus. De aceea sînt cele mai răspîndite aparate pentru măsurări industriale.

5. UTILIZĂRI

Aparatele feromagnetice se utilizează ca *ampermetre* și *voltmetre de curent alternativ*, de tablou sau portative.

● **Ampermetrele feromagnetice** nu se folosesc de obicei cu șunturi datorită posibilității de a confecționa bobine pentru curenți mari. Se pot realiza astfel aparate care pot măsura direct pînă la sute de amperi. De obicei însă se realizează ampermetre de 1 A sau de 5 A, iar pentru măsurarea curenților de intensități mai mari se folosesc transformatoare de curent.

● **În cazul folosirii ca voltmetre** se realizează aparate feromagnetice cu un curent nominal de 10—30 mA, ceea ce înseamnă o rezistență adițională de 30—100 Ω/V. Căderea de tensiune la bornele aparatelor feromagnetice este de circa 1 V. Pentru extinderea domeniului de măsurare pînă la cîteva sute de volți, se folosesc rezistențe adiționale. Pentru măsurarea tensiunilor mai mari, se folosesc transformatoare de tensiune.

B. APARATE ELECTRODINAMICE

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Funcționarea aparatelor electrodinamice se bazează pe acțiunea forțelor electrodinamice ce se exercită între bobine fixe și mobile parcurse de curenți. Din această interacțiune ia naștere cuplul activ care tinde să rotească bobina mobilă.

2. DESCRIEREA APARATULUI

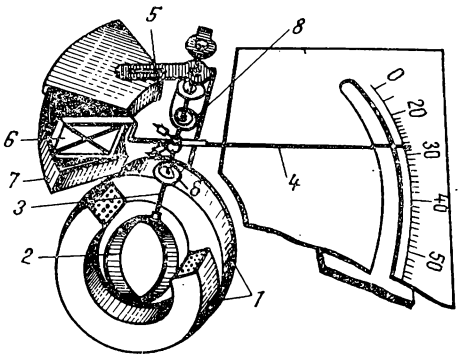


Fig. 4.3. Aparat electrodinamic.

Aparatul electrodinamic este reprezentat în figura 4.3. *Dispozitivul pentru producerea cuplului activ* este realizat din două bobine fixe *1*, legate în serie sau în paralel, printre care trece axul *3* al echipajului mobil pe care este fixată bobina mobilă *2*. *Cuplul rezistent* este creat de două arcuri spirale *8*, care servesc și la aducerea curentului la bobina mobilă. Unul dintre arcuri are un capăt fixat la *corectorul de zero 5*. Pe ax este montat și acul indicator *4*, care împreună cu scara gradată formează *dispozitivul de citire*. *Amortizorul* este pneumatic cu paletă sau cu piston *(6, 7)*.

3. FUNCȚIONAREA

● **Cuplul activ.** Aparatele electrodinamice având două circuite (bobinele fixe și bobina mobilă), pot fi parcurse de doi curenți, I_1 prin bobinele fixe și I_2 prin bobina mobilă. Din interacțiunea cîmpurilor create de cei doi curenți, apar forțe electrodinamice care acționează asupra bobinei mobile. Cuplul activ depinde de produsul celor doi curenți.

În curent continuu cuplul activ va fi:

$$M_a = kI_1I_2. \tag{4.3}$$

În curent alternativ, cuplul activ depinde de produsul valorilor instantanee ale intensităților celor doi curenți:

$$m_a = ki_1i_2. \tag{4.4}$$

În cazul curenților sinusoidali

$$i_1 = I_1\sqrt{2}\sin\omega t;$$

$$i_2 = I_2\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi),$$

unde φ este defazajul dintre cei doi curenți. În acest caz, cuplul activ va fi:

$$m_a = kI_1\sqrt{2}\sin\omega t \cdot I_2\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi) =$$
$$= kI_1I_2[\cos\varphi + \cos(2\omega t + \varphi)] =$$
$$= kI_1I_2\cos\varphi + kI_1I_2\cos(2\omega t + \varphi). \quad (4.5)$$

După cum reiese din relația (4.5), cuplul activ are două componente. Cea de-a doua, variind cosinusoidal în timp, are valoarea medie zero. Rezultă că valoarea medie a cuplului activ este:

$$M_{a\,med} = kI_1I_2\cos\varphi. \quad (4.6)$$

● Echipajul mobil nu va putea urmări variațiile cuplului activ, ci se va deplasa sub acțiunea cuplului activ mediu, pînă cînd **cuplul rezistent** devine egal cu cuplul activ.

● Din relația de echilibru $M_a = M_r$ rezultă **caracteristica statică de funcționare** a aparatelor electrodinamice.

În curent continuu:

$$\alpha = KI_1I_2. \quad (4.7)$$

În curent alternativ:

$$\alpha = KI_1I_2\cos\varphi. \quad (4.8)$$

4. UTILIZĂRI

Aparatele electrodinamice se pot folosi ca *ampermetre, voltmetre* sau *wattmetre.*

● **Ampermetrele electrodinamice.** *Pentru curenți mici,* sub 0,5 A, bobinele fixe și bobina mobilă se leagă în serie (fig. 4.4, *a*). În acest caz $I_1 = I_2 = I$ și relațiile (4.7) și (4.8) devin:

$$\alpha = KI^2. \quad (4.9)$$

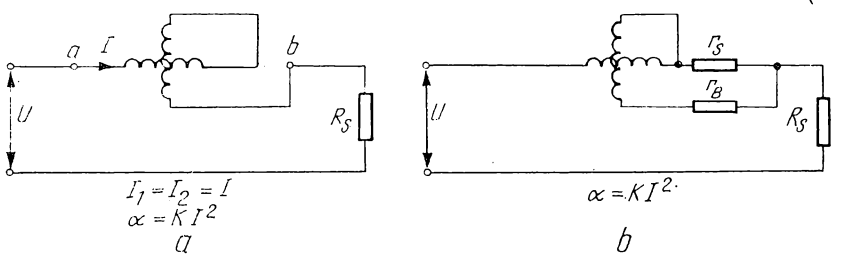


Fig. 4.4. Ampermetru electrodinamic:
a — pentru curenți mici; *b* — pentru curenți mari.

Relația (4.9) indică o scară pătratică pentru ampermetrele electrodinamice cînd K este independent de α. În practică, prin soluții constructive adecvate se obține un factor K scăzător cu α, astfel încît scara aparatului se uniformizează (cu excepția primelor repere).

Pentru curenți mai mari se folosește de obicei schema din figura 4.4, *b*, în care bobina mobilă este legată în serie cu bobina fixă și este montată în paralel cu șuntul r_s. Astfel, prin bobina mobilă trece numai o parte din curentul care străbate bobinele fixe. Rezistența r_B în serie cu bobina mobilă are rolul de a evita erorile suplimentare date de variația temperaturii sau de variația frecvenței (rezistența r_B, confecționată din manganină, nu variază cu frecvența, pe cînd bobina mobilă are înfășurarea din cupru a cărui rezistență variază cu aproximativ 0,4%/K; de asemenea bobina mobilă prezintă o reactanță inductivă ce variază cu frecvența).

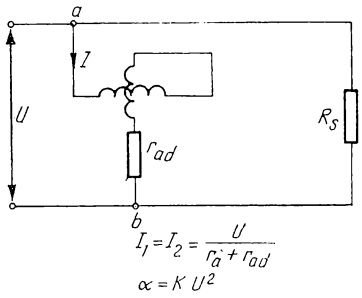


Fig. 4.5. Voltmetru electrodinamic.

● **Voltmetre electrodinamice.** Voltmetrele electrodinamice se realizează dintr-un miliampermetru electrodinamic în serie cu o rezistență adițională (fig. 4.5). Curentul $I = I_1 = I_2$ ce trece prin bobinele aparatului legate în serie va fi:

$$I = \frac{U}{r_a + r_{ad}}, \tag{4.10}$$

unde:

U este tensiunea de măsurat;

r_a — rezistența bobinelor aparatului legate în serie;

r_{ad} — rezistența adițională.

Ținînd seamă de relația (4.10), relațiile (4.7) și (4.8) devin:

$$\alpha = K\left(\frac{U}{r_a + r_{ad}}\right)^2 = K_1 U^2. \tag{4.11}$$

Relația (4.11) indică o scară pătratică cînd K este independent de α. Și în acest caz, ca și la ampermetre, prin soluții constructive convenabile se poate obține un factor K scăzător cu α, astfel încît scara aparatului să se uniformizeze.

● **Wattmetre electrodinamice.** Cel mai frecvent, aparatele electrodinamice sînt utilizate ca wattmetru. În acest caz, bobina mobilă și bobinele fixe nu se leagă între ele, ci formează circuite independente

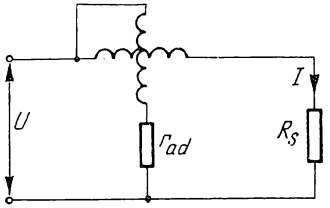


Fig. 4.6. Wattmetru electrodinamic.

(fig. 4.6). Bobinele fixe, numite *bobine de curent*, se leagă în serie în circuit, prin ele trecînd același curent ca și prin sarcină ($I_1 = I$). Bobina mobilă, numită *bobină de tensiune*, se leagă împreună cu o rezistență adițională în paralel pe circuit astfel încît curentul ce o parcurge este $I_2 = \frac{U}{r + r_{ad}}$, unde r este rezistența bobinei mobile. În acest caz, relația (4.7) devine:

$$\alpha = KI \frac{U}{r + r_{ad}} = K_1 IU = K_1 P, \qquad (4.12)$$

iar relația (4.8) devine:

$$\alpha = KI \frac{U}{r + r_{ad}} \cos \varphi = K_1 IU \cos \varphi = K_1 P. \qquad (4.13)$$

În cazul wattmetrelor se poate realiza o scară uniformă, obținînd prin construcție un factor K independent de α.

5. PROPRIETĂȚI

Aparatele electrodinamice, cînd sînt folosite ca *wattmetre, au scară uniformă*. Ca *ampermetre și voltmetre au scară neuniformă*, dar prin soluții constructive convenabile se poate realiza o uniformizare a scării gradate.

Sensibilitatea aparatelor electrodinamice *este bună*, putîndu-se măsura intensități ale curentului începînd cu ordinul miliamperilor.

Precizia este foarte bună, ele fiind cele mai precise aparate de curent alternativ (începînd cu clasa 0,1). Din acest motiv sînt folosite ca ampermetre și voltmetre etalon și de laborator pentru c.a.

Consumul propriu de putere este foarte mare (2—10 W).

Aparatele electrodinamice *funcționează atît în curent continuu, cît și în curent alternativ*. În curent alternativ, curentul își schimbă sensul în ambele bobine simultan, astfel încît cuplul activ are mereu același sens.

Indicațiile sînt influențate de frecvența curentului, ceea ce face ca aceste aparate să fie utilizate pînă la circa 1 500 Hz.

Aparatele electrodinamice *sînt puternic influențate de cîmpurile magnetice exterioare*, deoarece cîmpul lor propriu, închizîndu-se prin aer, este slab. Din acest motiv aparatele se ecranează sau se construiesc astatice.

Deoarece curentul este adus la bobina mobilă prin arcurile spirale, aparatele electrodinamice *sînt sensibile la suprasarcini*.

Datorită construcției complicate, *au cost ridicat*.

C. APARATE FERODINAMICE

Aparatele ferodinamice au același principiu de funcționare ca și aparatele electrodinamice, cu deosebirea că bobinele au miezuri feromagnetice. Datorită acestui fapt, cîmpul magnetic este mai intens, forțele electrodinamice sporesc, ceea ce face ca sensibilitatea aparatelor să fie mai mare. În schimb, precizia scade datorită pierderilor în fier, a fenomenului de histerezis și a curenților turbionari ce iau naștere în miezul magnetic.

Cîmpul propriu fiind mai puternic, aparatele ferodinamice sînt mai puțin influențate de cîmpurile exterioare.

Aparatele ferodinamice sînt foarte răspîndite și se folosesc de obicei ca *wattmetre* sau *varmetre*.

D. APARATE CU REDRESOR ȘI APARATE UNIVERSALE

Aparatul cu redresor este alcătuit dintr-un *aparat magnetoelectric* și un *redresor*.

Dintre toate tipurile de aparate de măsurat electrice, aparatul magnetoelectric prezintă proprietățile cele mai avantajoase, dar funcționează numai în curent continuu. Asociindu-se un aparat magnetoelectric cu un redresor se obține un aparat care păstrează calitățile aparatului magnetoelectric (sensibilitate mare, consum de putere redus, puțin influențat de cîmpurile exterioare), dar care funcționează în curent alternativ.

● **Redresorul** este un dispozitiv care lasă să treacă curentul într-un singur sens, transformînd în acest mod curentul alternativ în curent continuu pulsatoriu. Caracteristica curent-tensiune a unui element redresor este reprezentată în figura 4.7, în care se vede că la aplicarea unor tensiuni pozitive elementul redresor lasă să treacă curentul electric, în timp ce la aplicarea unor tensiuni negative intensitatea curentului este mult mai mică, practic neglijabilă (pentru valorile negative intensitatea curentului este de ordinul microamperilor).

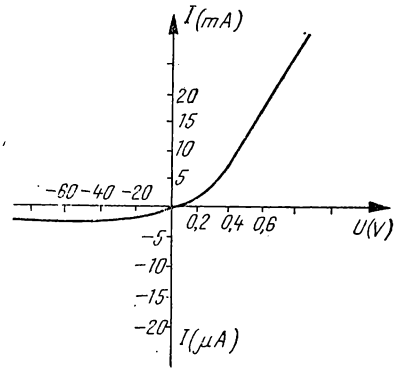


Fig. 4.7. Caracteristica curent-tensiune a unui element redresor.

Ca elemente redresoare se folosesc *redresoare cu cuproxid* sau *diode semiconductoare*.

● Elementele redresoare se asociază cu aparatul magnetoelectric în diferite **scheme de redresare.** Astfel se întîlnesc:

— *scheme cu redresarea unei singure alternanțe:*
  — fără transformator;
  — cu transformator;

— *scheme cu redresarea ambelor alternanțe:*
  — cu transformator cu priză mediană;
  — în punte.

1. APARATE CU REDRESOR CU REDRESAREA UNEI SINGURE ALTERNANȚE

În figura 4.8 sînt reprezentate schemele aparatelor care folosesc redresarea unei singure alternanțe.

Cea mai simplă schemă, cea din figura 4.8, *a* constă dintr-un redresor *R* în serie cu un aparat magnetoelectric. La aplicarea unei tensiuni alternative la bornele acestui circuit, redresorul permite trecerea curentului într-un singur sens (numai în cursul unei alternanțe). În cealaltă alternanță, redresorul prezintă o rezistență foarte mare, ceea ce face ca aproape toată tensiunea să se regăsească la bornele sale. Această situație ar putea duce la străpungerea redresorului. De asemenea, în timpul alternanței în care redresorul nu conduce, curentul în circuit se întrerupe.

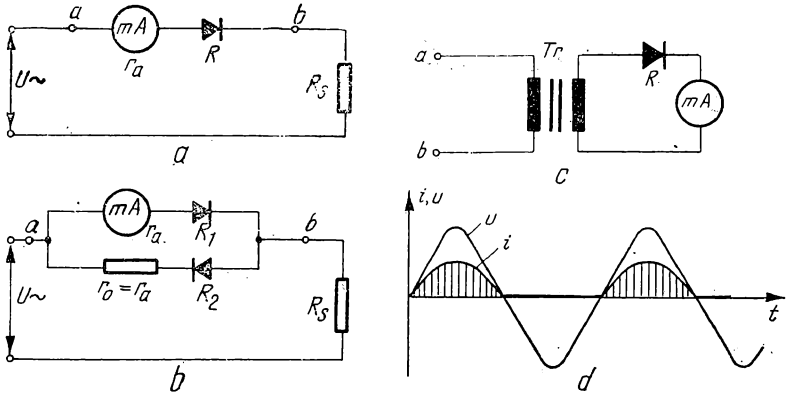


Fig. 4.8. Aparate cu redresor cu redresarea unei singure alternanțe:
a — cu diodă; *b* — cu două diode; *c* — cu transformator; *d* — diagramele curentului și tensiunii în cazul redresării unei singure alternanțe.

Pentru a evita aceste fenomene, în practică se utilizează schema din figura 4.8, *b*. În această schemă se conectează în paralel cu redresorul R_1 și cu aparatul magnetoelectric, încă un redresor, R_2, cu polaritate inversă, în serie cu o rezistență r_0 egală cu rezistența r_a a aparatului magnetoelectric.

În figura 4.8, *c* este reprezentată schema cu transformator.

În toate cele trei scheme menționate, la aplicarea unei tensiuni sinusoidale curentul trece prin aparatul magnetoelectric numai în timpul unei singure alternanțe, deci are o formă pulsatorie. Cuplul activ, care este proporțional cu intensitatea curentului, are aceeași formă de variație în timp. Inerția echipajului mobil nu permite urmărirea acestor variații, ci doar a valorii medii. Cuplul activ mediu este proporțional cu valoarea medie a curentului și ca urmare indicația aparatului va fi:

$$\boxed{\alpha = KI_{med}.} \tag{4.14}$$

Deci, *aparatele cu redresor au indicațiile proporționale cu valoarea medie a intensității curentului electric.*

În practică însă, de cele mai multe ori este necesar să se măsoare valoarea eficace a intensității curentului. În acest scop, scara gradată a aparatelor cu redresor se transcrie în valori eficace, folosind un factor de proporționalitate care depinde de forma curentului.

Astfel, în curent alternativ sinusoidal

$$I_{med} = \frac{I_{max}}{\pi} \text{ și } I_{max} = \sqrt{2}\, I_{ef}, \text{ deci } I_{med} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{ef}.$$

Înlocuind în expresia (4.14) valoarea lui I_{med}, se obține:

$$\alpha = K \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{ef} = K_1 I_{ef}. \tag{4.15}$$

Pe baza relației (4.15) aparatele cu redresor se pot etalona în valori eficace.

○ **Atenție!** *Această etalonare este valabilă numai pentru curenți de formă sinusoidală.*

2. APARATE CU REDRESOR CU REDRESAREA AMBELOR ALTERNANȚE

Aparatele care folosesc scheme cu redresarea ambelor alternanțe, se caracterizează printr-o sensibilitate mai bună, întrucît la aplicarea unei tensiuni alternative curentul trece prin aparat în timpul ambelor alternanțe în același sens (fig. 4.9).

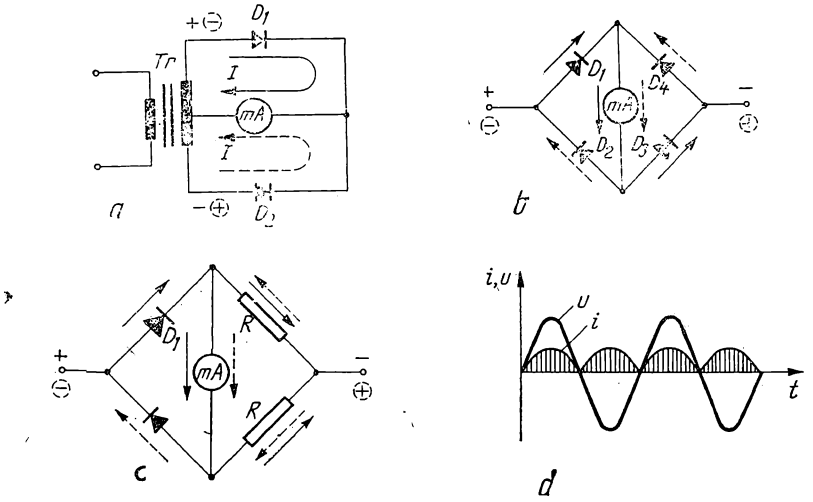


Fig. 4.9. Aparate cu redresor cu redresarea ambelor alternanțe:
a — cu transformator cu priză mediană; *b* — în punte cu patru diode; *c* — în punte cu două diode; *d* — diagramele curentului și tensiunii în cazul redresării ambelor alternanțe.

În *schema cu transformator cu priză mediană*, reprezentată în figura 4.9, *a*, dioda D_1 conduce într-o alternanță, iar dioda D_2 conduce în cealaltă. De fiecare dată curentul trece prin aparat în același sens.

În *schema în punte* din figura 4.9, *b*, în timpul unei alternanțe conduc diodele D_1 și D_3, iar în timpul celeilalte conduc diodele D_2 și D_4. Schema din figura 4.9, *c* este mai economică deoarece utilizează doar două diode, însă are o sensibilitate mai redusă, curentul derivîndu-se și prin rezistențele R montate în punte.

După cum se vede în figura 4.9, *d*, într-o perioadă prin aparat trec două impulsuri de curent. Dacă s-a notat cu I_{mcd} valoarea medie corespunzătoare unei alternanțe, în cazul aparatelor cu redresarea ambelor alternanțe $\alpha = 2K \cdot I_{mcd}$, deci la aceeași valoare a curentului de măsurat indicația este de două ori mai mare și ca urmare sensibilitatea este dublă.

3. APARATE UNIVERSALE (MULTIMETRE)

Aparatele universale, care se numesc și multimetre, sînt aparate destinate să măsoare diferite mărimi electrice. Ele folosesc ca instrument indicator un aparat magnetoelectric însoțit de un redresor. Aparatele universale se realizează într-o mare varietate de tipuri constructive, care pot fi clasificate după posibilitățile de măsurare în: *voltampermetre, avometre* și *aparate universale complexe.*

a. Voltampermetre

Voltampermetrele sînt cele mai simple aparate universale. După cum le spune și numele, ele măsoară tensiuni electrice și intensități ale curentului electric. Folosind diferite rezistențe adiționale și diferite șunturi (de obicei șunt universal), ele funcționează cu mai multe intervale de măsurare. Se pot utiliza atît în curent continuu, folosind aparatul magnetoelectric fără redresor, cît și în curent alternativ cînd prin intermediul unui comutator se introduce redresorul. Un exemplu de voltampermetru este reprezentat în figura 4.10.

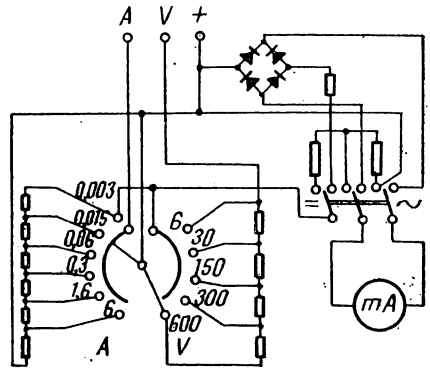


Fig. 4.10. Voltampermetru pentru c.c. și c.a.

b. Avometre

Avometrele (amper-volt-ohmmetre) îndeplinesc toate funcțiile voltampermetrelor și în plus pot funcționa ca ohmmetre cu una sau mai multe limite de măsurare. În acest scop, ele sînt dotate cu o baterie chimică pentru alimentarea circuitului de ohmmetru și cu o rezistență variabilă pentru reglarea aparatului înainte de utilizare.

c. Aparate universale complexe

În prezent se construiesc aparate universale complexe care, în afara măsurărilor posibile cu avometrul, mai permit și alte măsurări cum ar fi: măsurarea capacităților, măsurări în decibeli, măsurarea tranzistoarelor etc.

Aparatele universale se caracterizează prin numărul de mărimi ce pot fi măsurate, prin limitele de măsurare corespunzătoare diferitelor mărimi, prin precizia și sensibilitatea lor.

Calitatea aparatelor universale se apreciază prin cea mai mică limită de măsurare pentru intensitatea curentului continuu (10 μA, 20 μA, 50 μA ...) sau prin rezistența adițională exprimată în Ω/V.

Aparatele universale de bună calitate au valori ale rezistenței adiționale între 10 000 Ω/V și 100 000 Ω/V.

În țara noastră se construiesc aparate universale la „Întreprinderea de aparate de măsurat" din Timișoara.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. De ce aparatele feromagnetice sînt foarte răspîndite?
2. De ce aparatele electrodinamice se folosesc ca ampermetre și voltmetre etalon și de laborator?
3. Care dintre aparatele studiate se pot folosi ca wattmetre și de ce?
4. Ce motive au dus la asocierea aparatului magnetoelectric cu un redresor?
5. Dacă un aparat cu redresor are scara gradată în valori eficace poate fi folosit la măsurarea unor curenți de formă dreptunghiulară? Dar dacă scara este gradată în valori medii?
6. Prin ce se caracterizează un multimetru? Dar calitatea lui prin ce se apreciază?
7. Care este deosebirea dintre un voltampermetru și un avometru?

Capitolul 5

MĂSURAREA PUTERII ELECTRICE

A. NOȚIUNI GENERALE

Puterea reprezintă energia consumată în unitatea de timp:

$$P = \frac{W}{t}. \tag{5.1}$$

Unitatea de măsură pentru putere în Sistemul Internațional (SI) este *watul,* având ca simbol W.

În c.c. întreaga energie absorbită de un consumator de la o sursă se consumă, în sensul că se transformă în alte forme de energie (calorică, mecanică, luminoasă etc.).

În c.a. nu întotdeauna întreaga energie absorbită de la sursă se consumă. În cazul circuitelor ce conțin componente reactive (bobine sau condensatoare) o parte din energie se înmagazinează sub formă de energie reactivă. Avînd în vedere acest lucru, în c.a. se deosebesc următoarele tipuri de puteri electrice:

— *putere aparentă;*

— *putere activă;*

— *putere reactivă.*

Puterea aparentă *este egală cu produsul dintre valoarea eficace a tensiunii la care se alimentează consumatorul și valoarea eficace a intensității curentului ce trece prin consumator:*

$$S = UI. \tag{5.2}$$

Unitatea de măsură pentru puterea aparentă este *voltamperul* [VA].

Puterea activă *reprezintă puterea consumată* (transformată în alte forme de energie) *și este egală cu produsul dintre valoarea eficace a tensiunii,*

valoarea eficace a intensității curentului și cosinusul unghiului φ, *de defazaj dintre tensiune și curent:*

$$P = UI \cos \varphi. \tag{5.3}$$

Unitatea de măsură pentru puterea activă este *watul* [W].

Puterea reactivă *reprezintă energia care circulă între generator și receptor în unitatea de timp, fără a se transforma în alte forme de energie.* Această energie este înmagazinată de componentele reactive sub formă de cîmp electric în cazul condensatoarelor sau de cîmp electromagnetic în cazul bobinelor. Puterea reactivă *este egală cu produsul dintre valoarea eficace a tensiunii, valoarea eficace a intensității curentului și sinusul unghiului* φ, *de defazaj între tensiune și curent:*

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \tag{5.4}$$

Unitatea de măsură pentru puterea reactivă este *varul* [var].

Între puterile aparentă, activă și reactivă există relația:

$$S^2 = P^2 + Q^2. \tag{5.5}$$

B. MĂSURAREA PUTERII ELECTRICE ÎN C.C.

1. METODA AMPERMETRULUI ȘI VOLTMETRULUI

În c.c. puterea se poate calcula cu relația:

$$P = U \cdot I. \tag{5.6}$$

Pornind de la această relație, se poate deduce că puterea consumată în c.c. de un receptor avînd rezistența electrică R se poate măsura cu un voltmetru și un ampermetru folosind un montaj ca în figura 5.1. Voltmetrul se va monta fie *în amonte* (comutatorul K pe poziția a), fie *în aval* (comutatorul K pe poziția b), în funcție de mărimea rezistenței R. Cînd $R \gg r_a$ (r_a fiind rezistența ampermetrului se va folosi varianta amonte. Cînd $R \ll r_v$ (r_v fiind rezistența voltmetrului) se va folosi varianta aval.

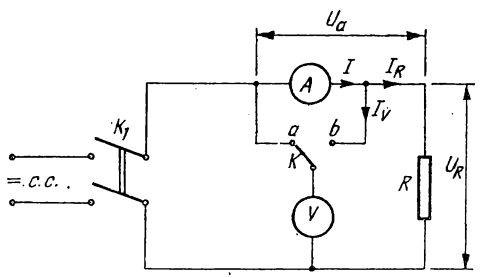


Fig. 5.1. Măsurarea puterii în c.c. cu ampermetrul și voltmetrul.

● **În varianta amonte** voltmetrul va indica $U = U_R + U_a$, iar ampermetrul va indica $I = I_R$. Citind indicațiile voltmetrului și ampermetrului și aplicînd relația (5.6) se obține:

$$P = U \cdot I = (U_R + U_a)I = U_R I + U_a I = I^2 R + I^2 r_a = P_R + P_a,$$

unde P_R este puterea consumată de receptorul R, iar P_a este puterea consumată de ampermetru. Dacă $R \gg r_a$, atunci $P_a \ll P_R$ și se poate considera cu o eroare acceptabilă $P \cong P_R$.

● **În varianta aval,** ampermetrul măsoară $I = I_R + I_v$, iar voltmetrul $U = U_R$. Citind indicațiile ampermetrului și voltmetrului și aplicînd relația (5.6) se obține:

$$P = U \cdot I = U(I_R + I_v) = U \cdot I_R + U \cdot I_v = \frac{U^2}{R} + \frac{U^2}{r_v} = P_R + P_v,$$

unde P_R este puterea consumată de receptorul R, iar P_v este puterea consumată de voltmetru. Dacă $R \ll r_v$, atunci $P_v \ll P_R$ și se poate considera cu o eroare acceptabilă $P \cong P_R$.

2. MĂSURAREA CU WATTMETRUL ELECTRODINAMIC SAU FERODINAMIC

După cum se știe din capitolul IV, indicația aparatelor electrodinamice și ferodinamice în c.c. este proporțională cu produsul intensităților curenților ce străbat bobinele fixe și mobile ale aparatelor:

$$\alpha = K \cdot I_1 \cdot I_2. \tag{5.7}$$

Dacă bobinele fixe, numite și bobine de curent, se montează în serie cu consumatorul, $I_1 = I$ și dacă bobina mobilă numită și bobină de tensiune, împreună cu o rezistență adițională, r_{ad}, se montează în paralel cu consumatorul, atunci $I_2 = \frac{U}{r_{ad}}$ și relația (5.7) devine:

$$\alpha = KI\frac{U}{r_{ad}} = K_1 IU = K_1 P. \tag{5.8}$$

Relația (5.8) arată că indicația aparatelor electrodinamice și ferodinamice este proporțională cu puterea electrică și ca urmare ele se pot grada direct în wați, obținîndu-se o *scară uniformă.*

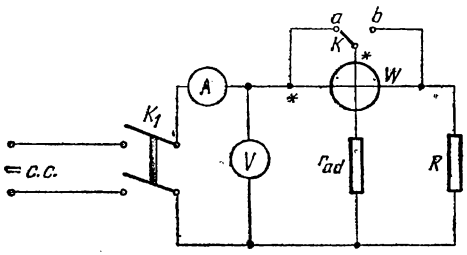


Fig. 5.2. Măsurarea puterii în c.c. cu wattmetrul electrodinamic.

● **Montajul utilizat pentru măsurarea puterii electrice cu wattmetrul electrodinamic sau ferodinamic** este cel din figura 5.2.

○ **Observație.** Deoarece la wattmetre există pericolul de supraîncărcare chiar dacă indicația aparatului este în limita de măsurare (valorile lui I sau U pot depăși valorile nominale chiar dacă produsul IU este în limite normale), la utilizarea wattmetrului este necesar să se monteze un ampermetru în serie și un voltmetru în paralel cu ajutorul cărora să se poată urmări încărcarea wattmetrului.

Se observă că și în cazul montajului din figura 5.2 se poate alege *varianta amonte* (K pe poziția a) sau *aval* (K pe poziția b) după aceleași criterii ca și la metoda ampermetrului și voltmetrului.

● **Montarea wattmetrului în circuit.** Pentru a obține o indicație corectă, în sensul că acul indicator să se deplaseze de la stînga la dreapta, este necesar să se respecte o anumită ordine de legare a celor două bobine. În acest scop, wattmetrele sînt prevăzute cu cîte o bornă marcată printr-un semn distinctiv atît la bobina de curent, cît și la bobina de tensiune. Bornele marcate se vor lega întotdeauna spre sursă, ca în figura 5.2.

● **Wattmetre cu mai multe domenii de măsurare.** Wattmetrele cu mai multe domenii de măsurare sînt prevăzute cu mai multe domenii pentru intensitatea curentului electric și mai multe domenii pentru tensiune. De exemplu: $I_1 = 0{,}5$ A; $I_2 = 1$ A; $U_1 = 150$ V; $U_2 = 300$ V.

Pentru a putea determina puterea măsurată de wattmetru, este necesar să se cunoască constanta K_W a wattmetrului, corespunzătoare domeniilor alese pentru intensitatea curentului și pentru tensiune. *Constanta K_W reprezintă puterea corespunzătoare unei diviziuni a scării gradate.* Dacă wattmetrul are α_{max} diviziuni, de exemplu $\alpha_{max} = 150$ diviziuni, constanta K_W se calculează cu relația:

$$K_W = \frac{I_n \cdot U_n}{\alpha_{max}} \left[\frac{\text{W}}{\text{div}}\right], \tag{5.9}$$

unde:

I_n este domeniul de măsurare ales pentru intensitatea curentului;

U_n — domeniul de măsurare ales pentru tensiune;

α_{max} — numărul maxim de diviziuni al scării gradate.

Puterea măsurată de wattmetru în cazul în care acul indicator arată α diviziuni, va fi:

$$P = K_W \cdot \alpha. \tag{5.10}$$

C. MĂSURAREA PUTERII ELECTRICE ÎN CIRCUITE DE C.A. MONOFAZAT

1. MĂSURAREA PUTERII APARENTE

Avînd în vedere că puterea aparentă este egală cu produsul dintre intensitatea curentului absorbit de un consumator și tensiunea la care se alimentează consumatorul, se poate deduce că măsurarea acesteia se poate realiza *cu un voltmetru și un ampermetru.* Montajul folosit este reprezentat în figura 5.3. După cum se observă, și în cazul acestui montaj ca și în cel reprezentat în figura 5.1, se poate alege *varianta amonte* sau *varianta aval,* în funcție de impedanța consumatorului Z. Citind indicațiile ampermetrului și voltmetrului și neglijînd puterile absorbite de cele două aparate (în cazul alegerii corecte a variantei aval sau amonte), puterea aparentă se poate calcula cu relația:

$$S = U \cdot I.$$

2. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE

Puterea activă se poate măsura *cu wattmetrul electrodinamic* sau *ferodinamic.* În c.a., după cum s-a arătat în capitolul IV, indicația aparatelor electrodinamice și ferodinamice este:

$$\alpha = K \cdot I_1 \cdot I_2 \cos (\widehat{I_1 I_2}). \tag{5.11}$$

Dacă, la fel ca în c.c., se va monta un astfel de aparat cu bobinele fixe în serie cu consumatorul, iar bobina mobilă împreună cu o rezistență adițională se va monta în paralel cu consumatorul, atunci $I_1 = I$, $I_2 = \frac{U}{r_{ad}}$ și relația (5.11) devine:

$$\alpha = K \cdot I \frac{U}{r_{ad}} \cos (\widehat{IU}) =$$

$$= K_1 I \cdot U \cos \varphi = K_1 P. \tag{5.12}$$

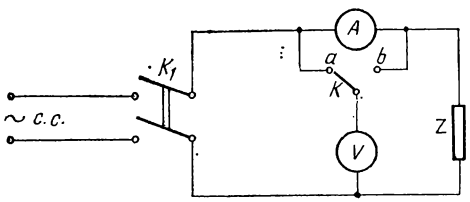


Fig. 5.3. Măsurarea puterii aparente.

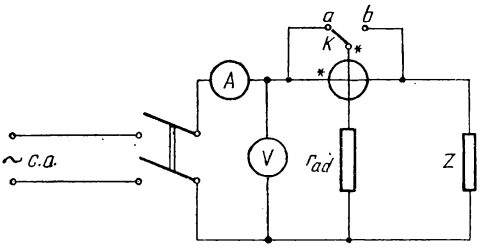


Fig. 5.4. Măsurarea puterii active cu wattmetrul electrodinamic.

Relația (5.12) arată că în c.a. indicația aparatelor electrodinamice și ferodinamice este proporțională cu puterea activă și ca urmare ele pot fi folosite ca wattmetre.

Montarea wattmetrelor în circuit se va face ca în figura 5.4, alegînd *varianta amonte* sau *aval*, în funcție de mărimea consumatorului Z, avînd grijă ca bornele marcate să fie legate spre sursă. Cînd wattmetrele au mai multe domenii de măsurare, se va proceda ca și în cazul măsurării puterii în c.c.

3. MĂSURAREA PUTERII REACTIVE

Puterea reactivă se poate măsura fie *indirect*, fie *direct cu aparate a căror scară este gradată în vari*, numite varmetre.

● **Metoda indirectă.** Cunoscînd relația (5.5) care leagă între ele puterile aparente, activă și reactivă, puterea reactivă se poate determina măsurînd puterea aparentă prin metoda ampermetrului și voltmetrului, puterea activă cu wattmetrul electrodinamic sau ferodinamic și aplicînd relația:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Metoda indirectă se folosește mai rar deoarece nu dă rezultate precise din cauza numărului mare de aparate întrebuințate și a consumului acestora.

● **Măsurarea puterii reactive cu varmetrul.** Puterea reactivă se poate măsura direct cu aparate numite varmetre. Varmetrele sînt realizate tot cu aparate electrodinamice sau ferodinamice dar, spre deosebire de wattmetre, varmetrele au în serie cu bobina mobilă în loc de rezistență adițională o bobină sau un condensator, care introduc un defazaj suplimentar de 90^0.

După cum se știe, puterea reactivă este dată de relația:

$$Q = KI \sin \varphi,$$

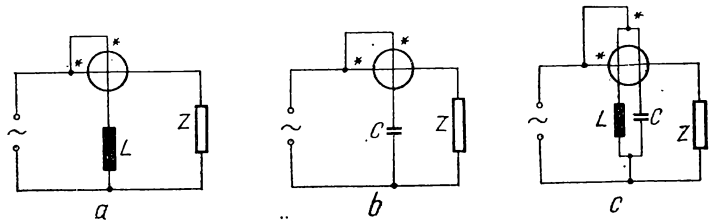


Fig. 5.5. Varmetre electrodinamice:
a — cu bobină adiţională; *b* — cu condensator adiţional; *c* — compensat.

iar indicaţia aparatelor electrodinamice şi ferodinamice este:

$$\alpha = KI_1I_2 \cos (\widehat{I_1I_2}),$$

unde I_1 este intensitatea curentului care trece prin bobina fixă, iar I_2 este intensitatea curentului care trece prin bobina mobilă. Dacă un aparat electrodinamic sau ferodinamic se montează cu bobina fixă în serie cu consumatorul, iar *bobina mobilă împreună cu o bobină adiţională de inductanţă mare* se montează în paralel cu consumatorul (fig. 5.5, *a*), atunci $I_1 = I$, $I_2 = \dfrac{U}{L\omega}$, iar unghiul de defazaj între I_1 şi I_2 devine $90^0 - \varphi$, deoarece bobina adiţională defazează curentul în urma tensiunii cu 90^0. În acest caz indicaţia devine:

$$\alpha = KI\frac{U}{L\omega}\cos (90^\circ - \varphi) = K\frac{1}{L\omega}IU\sin\varphi = \frac{K}{L\omega}Q. \quad (5.13)$$

Relaţia (5.13) arată că în cazul în care în locul rezistenţei adiţionale se montează o bobină adiţională, indicaţia aparatelor electrodinamice şi ferodinamice este proporţională cu puterea reactivă, deci ele funcţionează ca varmetre.

Dacă *în serie cu bobina mobilă se montează un condensator de capacitate* C (fig. 5.5, *b*), indicaţia devine:

$$\alpha = KIUC\omega \cos (90^0 + \varphi) = KIUC\omega \sin\varphi = KC\omega Q. \quad (5.14)$$

După cum se observă, şi în cazul bobinei adiţionale şi în cazul condensatorului adiţional, indicaţia depinde de frecvenţă. Pentru a se micşora influenţa frecvenţei asupra indicaţiilor, se construiesc *varmetre compensate*, cu două bobine de tensiune cuplate pe acelaşi ax,

una dintre ele în serie cu o bobină, iar cealaltă în serie cu un condensator (fig. 5.5, *c*). În acest caz se obține:

$$\alpha = K\left(\frac{1}{L\omega} + C\omega\right)Q.$$

La varmetrele compensate, în jurul frecvenței pentru care este îndeplinită condiția $LC\omega^2 = 1$ indicațiile sînt foarte puțin influențate de frecvență.

Montarea varmetrelor în circuit este asemănătoare cu montarea wattmetrelor, fiind necesară montarea bornelor marcate spre sursă. La o montare corectă varmetrul va indica în sensul normal dacă defazajul dintre U și I este inductiv și în sens contrar dacă defazajul este capacitiv. În acest ultim caz, se vor inversa bornele uneia dintre bobine.

Capitolul 6

MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE ÎN CIRCUITE DE C.A. MONOFAZATE

A. NOȚIUNI GENERALE

În capitolul precedent s-a definit puterea prin energia consumată în unitatea de timp. Dacă puterea rămîne constantă într-un anumit interval de timp, $t_2 - t_1$, se poate considera energia consumată în intervalul respectiv de timp ca fiind:

$$W = P(t_2 - t_1).$$

În general însă, în practică, puterea nu rămîne constantă. În acest caz, se poate împărți intervalul de timp $t_2 - t_1$ în intervale mici de timp Δt, în care să se considere că puterea rămîne constantă. În această ipoteză, energia activă consumată în intervalul de timp $t_2 - t_1$ se poate considera a fi egală cu suma energiilor active elementare consumate în intervalele Δt. Deci:

$$W = \sum_{k=1}^{n} P_k \, \Delta t_k, \tag{6.1}$$

unde:

$$\sum_{k=1}^{n} \Delta t_k = t_2 - t_1.$$

În mod analog se poate defini *energia reactivă* ca fiind:

$$W_r = \sum_{k=1}^{n} Q_k \Delta t_k. \tag{6.2}$$

Unitatea de măsură pentru energia activă este *wattsecunda*, iar pentru energia reactivă este varsecunda. În practică se folosesc multiplii wattoră și kilowattoră și respectiv varoră și kilovaroră.

Energia electrică se măsoară cu aparate numite **contoare.** Contoarele sînt alcătuite dintr-un *dispozitiv wattmetric* al cărui cuplu activ este proporțional cu puterea și *un mecanism integrator* care însumează energiile elementare într-un anumit interval de timp.

În funcție de mărimea măsurată, contoarele pot fi *de energie activă* sau *de energie reactivă.*

În funcție de principiul de funcționare, contoarele pot fi electrodinamice sau de inducție. Cel mai răspîndit contor este contorul de inducție. El funcționează însă numai în c.a. Pentru măsurarea energiei în c.c. se folosesc contoare electrodinamice.

B. CONTORUL DE INDUCȚIE

Contorul de inducție, reprezentat în figura 6.1, se compune dintr-un dispozitiv de inducție și un mecanism integrator.

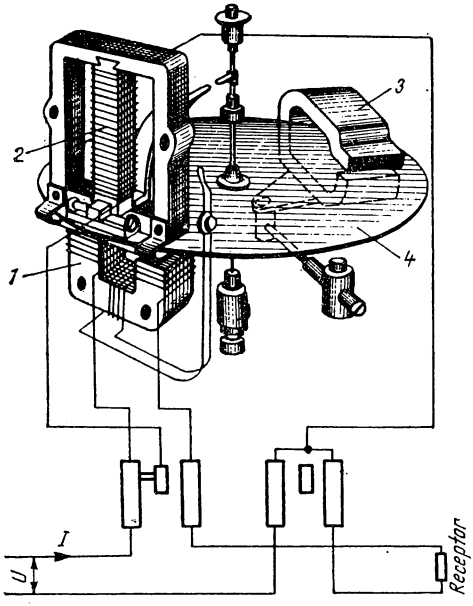


Fig. 6.1. Contor de inducție monofazat.

1. DISPOZITIVUL DE INDUCȚIE

● **Principiul de funcționare** al dispozitivului de inducție constă în acțiunea cîmpurilor magnetice create de circuite inductoare fixe, asupra curenților pe care aceste circuite îi induc în piese conductoare mobile. Din interacțiunea dintre cîmpurile magnetice și curenții induși, apare un cuplu activ care pune în mișcare piesa mobilă.

● Dispozitivul de inducție folosit în contoarele de c.a. **este realizat** dintr-un disc de aluminiu ce se poate roti în jurul unui ax vertical și doi electromagneți (un electromagnet de curent *1* și un electromagnet de tensiune *2*).

● **Funcționarea.** Electromagnetul de curent se montează în serie cu consumatorul, deci este parcurs de curentul I din circuit. El produce un flux Φ_I, care străbate de două ori discul în sensuri contrare. Electromagnetul de tensiune este montat în paralel cu consumatorul, deci este

alimentat cu tensiunea de la bornele consumatorului. El creează un flux Φ_U, care străbate discul o singură dată. Fluxurile Φ_U și Φ_I induc curenți în disc.

Datorită interacțiunii dintre curenții induși și fluxuri, ia naștere un **cuplu activ** care pune în mișcare discul. Se poate demonstra că acest cuplu activ este proporțional cu cele două fluxuri și cu sinusul unghiului α, de defazaj între ele:

$$M_a = K\Phi_I\Phi_U \sin \alpha.$$

Fluxul Φ_I este proporțional cu I și aproximativ în fază cu I. Fluxul Φ_U este proporțional cu U și defazat aproximativ cu $\frac{\pi}{2}$ față de U. Din acest motiv, cum puterea care se măsoară este $P = UI \cos \varphi = UI \sin (90° - \alpha)$ ($\varphi = 90^0 - \alpha$ este unghiul de defazaj între U și I) bobina de tensiune se realizează cu o inductanță mare. Ținînd seama de cele de mai sus se poate scrie:

$$M_a = K_1UI \sin (90^0 - \varphi) = K_1UI \cos \varphi = K_1P. \qquad (6.3)$$

Rezultă că cuplul activ este proporțional cu puterea din circuit.

Cuplului activ i se opune un **cuplu de frînare,** realizat cu un magnet permanent *3*. Cînd discul se rotește cu o viteză de rotație n, intersectează liniile de cîmp ale magnetului permanent și iau naștere în disc curenți induși, proporționali cu viteza de rotație n. Din interacțiunea acestor curenți cu fluxul creat de magnetul permanent, se obține un cuplu de frînare proporțional și el cu viteza de rotație a discului:

$$M_f = K_2n. \qquad (6.4)$$

Cînd cuplul de frînare devine egal cu cuplul activ, discul se rotește cu viteză constantă. În acest caz:

$$M_a = M_f,$$

adică

$$K_1P = K_2n,$$

de unde

$$n = \frac{K_1}{K_2} P = K_3P. \qquad (6.5)$$

Relația (6.5) arată că viteza de rotație a discului este proporțională cu puterea activă.

Numărul total de rotații $N = n(t_2 - t_1)$ pe care le face discul într-un interval de timp dat este proporțional cu suma energiilor elementare consumate în intervalul de timp respectiv, adică:

$$W = CN.$$

Constanta C se numește *constanta reală a contorului*. În practică se folosește frecvent inversul acestei constante

$$C_n = \frac{1}{C} = \frac{N}{W}\left[\frac{\text{rotații}}{\text{kWh}}\right].$$

C_n se numește constanta nominală a contorului și reprezintă numărul de rotații pe care le face discul pentru un consum de energie egal cu 1 kWh. De obicei această constantă este înscrisă pe carcasa contorului. De exemplu: C_n 480 rot/kWh.

2. MECANISMUL INTEGRATOR

Mecanismul integrator realizat cu roți dințate conține un sistem de transmisie și un dispozitiv de înregistrare. Sistemul de transmisie este astfel alcătuit încît la un număr de rotații ale discului egal cu constanta nominală, să se transmită primei roți a dispozitivului de înregistrare o mișcare egală cu o zecime de rotație. Cînd această roată, care indică unitățile, face o rotație completă a doua roată dințată care indică zecile se va roti cu o zecime de rotație ș.a.m.d.

3. CONECTAREA CONTOARELOR ÎN CIRCUIT

Conectarea contoarelor în circuit se face conform acelorași scheme ca și în cazul wattmetrelor.

Pentru măsurarea energiilor reactive se folosesc contoare de energie reactivă, la care cuplul activ este proporțional cu puterea reactivă.

Contoarele de energie uzuale sînt de clasa de precizie 2. Există și contoare de clasa 1 sau 0,5 folosite ca etaloane sau în scopuri speciale.

Tensiunea nominală a contoarelor monofazate este de 220 V, iar curenții nominali sînt de 10 A sau de 5 A.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. La măsurarea puterilor electrice, cînd se va alege varianta amonte? dar varianta aval?
2. Ce se întîmplă cînd bornele marcate ale wattmetrului nu sînt legate corect în circuit?
3. De ce la utilizarea wattmetrelor electrodinamice se recomandă să se folosească în montaj și un ampermetru și un voltmetru?
4. La măsurarea puterii active cu un wattmetru care are scara gradată cu 100 diviziuni, se alege $I_n = 0{,}5$ A și $U_n = 300$ V. Ce putere se va măsura cînd acul indicator arată 40 diviziuni? Dar cînd arată 74 diviziuni?
5. Ce deosebiri pot exista între un wattmetru electrodinamic și un varmetru electrodinamic?
6. Un contor are constanta nominală $C_n = 480$ rot/kWh. Cîte rotații a făcut discul de aluminiu, dacă se înregistrează un consum de energie egal cu 275 kWh?

CUPRINS

Introducere 3
Cap. 1. **Măsurări și metode de măsurare** 5
A. Măsurări 5
1. Unități de măsură 5
2. Sisteme de unități de măsură 6
3. Sistemul Internațional 6
B. Procesul de măsurare 7
1. Mijloace de măsurare 7
2. Metode de măsurare 9
C. Erori de măsurare 10
1. Definiții 10
2. Clasificarea erorilor 11
3. Erorile aparatelor de măsurat electrice 12
4. Clase de precizie ale aparatelor 13
D. Caracteristici metrologice 14
E. Noțiuni de legislație metrologică 14

Cap. 2. **Aparate de măsurat electrice** 16
A. Noțiuni generale 16
B. Aparate analogice indicatoare 17
1. Principiul de funcționare 17
2. Clasificarea aparatelor de măsurat indicatoare 18
3. Marcarea aparatelor de măsurat electrice 20
4. Părțile componente ale aparatelor de măsurat 20

Cap. 3. **Măsurări în curent continuu** 26
A. Aparate magnetoelectrice (cu bobină mobilă) 26
1. Principiul de funcționare 26
2. Descrierea aparatului 26
3. Funcționarea 27
4. Proprietăți 28
5. Utilizări 29
B. Măsurarea intensității curentului. Ampermetre 29
1. Montarea ampermetrelor în circuit 29
2. Extinderea intervalului de măsurare la ampermetre 31
3. Ampermetre cu mai multe intervale de măsurare 33

C. Măsurarea tensiunilor. Voltmetre 36
1. Montarea voltmetrelor în circuit 37
2. Extinderea intervalului de măsurare 38
3. Voltmetre cu mai multe limite de măsurare 40
D. Măsurarea rezistențelor electrice 40
1. Metoda ampermetrului și voltmetrului 41
2. Metode de comparație 43
3. Ohmmetre și megohmmetre 48

Cap. 4. **Aparate de măsurat pentru curent alternativ de joasă frecvență** 53
A. Aparate feromagnetice 53
1. Principiul de funcționare 53
2. Descrierea aparatului 53
3. Funcționarea 53
4. Proprietăți 55
5. Utilizări 56
B. Aparate electrodinamice 56
1. Principiul de funcționare 56
2. Descrierea aparatului 57
3. Funcționarea 57
4. Utilizări 58
5. Proprietăți 60
C. Aparate ferodinamice 61
D. Aparate cu redresor și aparate universale 61
1. Aparate cu redresor cu redresarea unei singure alternanțe 62
2. Aparate cu redresor cu redresarea ambelor alternanțe 63
3. Aparate universale (multimetre) 64

Cap. 5. **Măsurarea puterii electrice** 67
A. Noțiuni generale 67
B. Măsurarea puterii electrice în c.c. 68
1. Metoda ampermetrului și voltmetrului 68
2. Măsurarea cu wattmetrul electrodinamic sau ferodinamic 69
C. Măsurarea puterii electrice în circuite de c.a. monofazat 71
1. Măsurarea puterii aparente 71
2. Măsurarea puterii active 71
3. Măsurarea puterii reactive 72

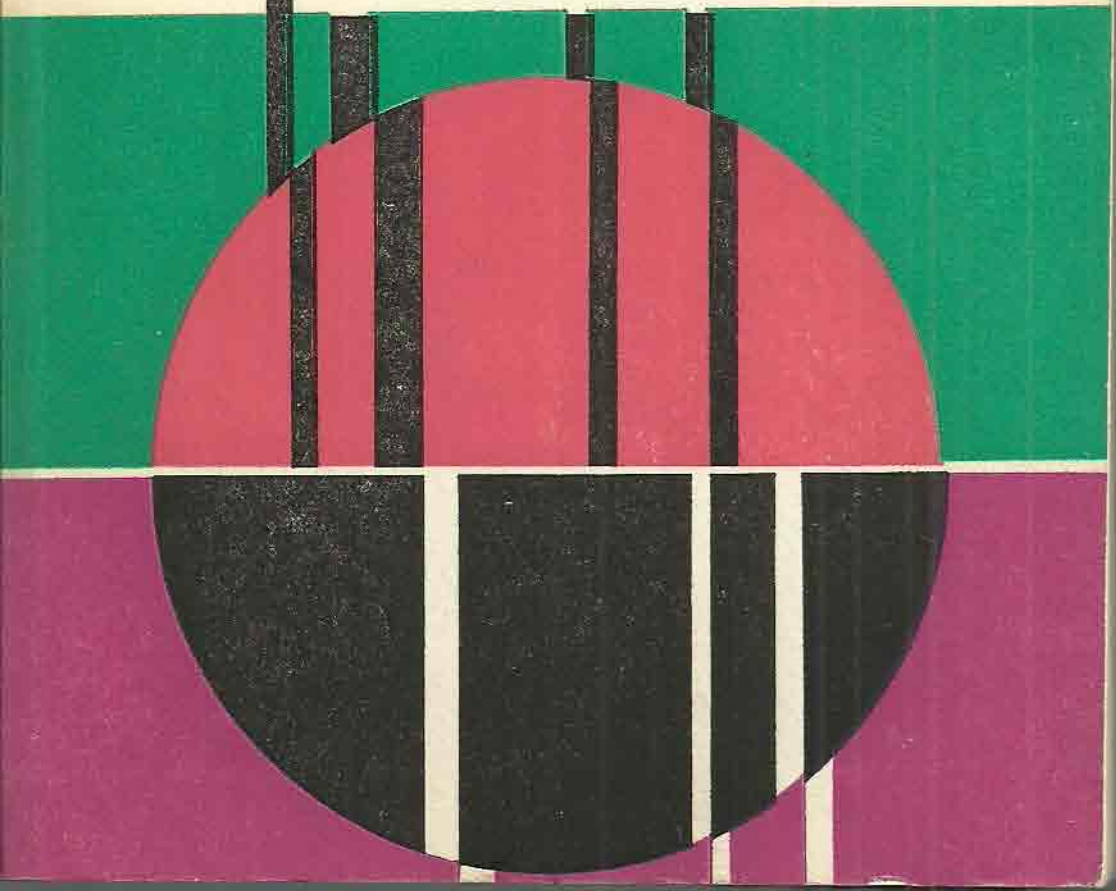
Cap. 6. **Măsurarea energiei electrice în circuite de c.a. monofazate** 75
A. Noțiuni generale 75
B. Contorul de inducție 76
1. Dispozitivul de inducție 76
2. Mecanismul integrator 78
3. Conectarea contoarelor în circuit 78

EUGENIA ISAC

·XI·

MĂSURĂRI ELECTRICE ȘI ELECTRONICE

MANUAL PENTRU LICEE CU PROFIL DE ELECTROTEHNICĂ, MATEMATICĂ-FIZICĂ ȘI AERONAUTICĂ, CLASA A XI-A



Ing. EUGENIA ISAC
profesor gradul I

MĂSURĂRI ELECTRICE ȘI ELECTRONICE

Manual pentru licee cu profilurile de electrotehnică, matematică-fizică și aeronautică, clasa a XI-a

Editura didactică și pedagogică
București, 1982

Manualul a fost elaborat conform programei școlare aprobate de Ministerul Educației și Învățământului cu nr. 36213/1981

Referent: dr. ing. AUREL MILLEA

Redactor: ing. MONICA URSEA

Tehnoredactor: OPRIȘEANU ELENA

CAPITOLUL 1

TRANSFORMATOARE DE MĂSURAT

Transformatoarele de măsurat sînt transformatoare electrice speciale, larg utilizate în tehnica măsurărilor datorită următoarelor avantaje:

— permit extinderea intervalelor de măsurare ale aparatelor de măsurat utilizate în curent alternativ (ampermetre, voltmetre, wattmetre, varmetre, contoare etc.);

— asigură protecția personalului de deservire, prin izolarea aparatelor de măsurat față de circuitele de înaltă tensiune;

— permit standardizarea aparatelor de măsurat pentru anumite valori adoptate la fabricarea în serie a acestora: 5 A sau 1 A pentru ampermetre și 100 V sau 110 V pentru voltmetre.

După mărimea pe care o reduc, transformatoarele de măsurat se împart în *transformatoare de curent* și *transformatoare de tensiune.*

Uneori, ele sînt numite „reductoare" de curent sau de tensiune.

Principiul de funcționare al acestor transformatoare este asemănător cu cel al transformatoarelor de forță și constă în transferul de energie electromagnetică de la o înfășurare primară la o înfășurare secundară, prin fenomenul de inducție electromagnetică.

Construcția. Un transformator este un ansamblu de bobine (înfășurări) cuplate magnetic. Pentru a se realiza un cuplaj magnetic strîns, cele două înfășurări sînt așezate pe un miez magnetic comun, astfel încît aproape tot fluxul magnetic creat de o înfășurare să treacă și prin cealaltă. În figura 1.1 este reprezentat schematic un transformator. Pe miezul magnetic sînt înfășurate N_1 spire reprezentînd înfășurarea primară și N_2 spire reprezentînd înfășurarea secundară. La bornele înfășurării primare se aplică o tensiune U_1, iar la bornele înfășurării secundare se obține o tensiune U_2. Prin înfășurarea primară trece un curent de intensitate I_1, iar prin înfășurarea secundară — un curent de intensitate I_2. Rolul transformatorului este de a transmite energia electromagnetică din circuitul primar în circuitul secundar,

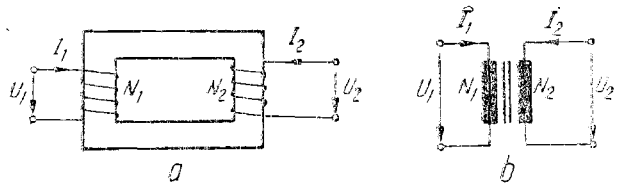


Fig. 1.1. Transformatorul:
a — principiu; *b* — reprezentare.

modificînd parametrii care caracterizează această energie (tensiunea și curentul de la ieșire au valori diferite de cele ale tensiunii și curentului de la intrare).

In cazul unui transformator ideal, la care se neglijează pierderile, notînd cu P_1 puterea în circuitul primar și cu P_2 puterea în circuitul secundar, se poate scrie:

$$P_1 = P_2 \qquad (1.1)$$

sau

$$I_1 U_1 = I_2 U_2, \qquad (1.2)$$

de unde:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}. \qquad (1.3)$$

Știind că ambele înfășurări sînt străbătute de același flux magnetic și considerînd lungimea tuturor spirelor egală, se poate afirma că în fiecare spiră se induce aceeași tensiune U_{sp}. Înfășurarea primară, care are N_1 spire, va avea la bornele sale o tensiune $U_1 = N_1 U_{sp}$, iar înfășurarea secundară, care are N_2 spire, va avea la bornele sale o tensiune $U_2 = N_2 U_{sp}$. Reluînd relația (1.3), se poate scrie:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2 U_{sp}}{N_1 U_{sp}} = \frac{N_2}{N_1}. \qquad (1.4)$$

De aici rezultă că raportul curenților este invers proporțional cu raportul tensiunilor și că raportul tensiunilor este proporțional cu raportul numărului de spire.

La un transformator real aceste proprietăți se păstrează, cu o anumită aproximație, datorită unor fenomene care vor fi arătate în continuare.

A. TRANSFORMATOARE DE CURENT

La măsurarea unor curenți alternativi a căror intensitate depășește 50 A, ajungînd pînă la zeci de mii de amperi, se folosesc ampermetre de 5 A sau de 1 A împreună cu transformatoare de curent (fig. 1.2).

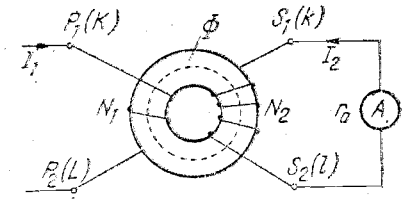


Fig. 1.2. Transformator de curent.

1. FUNCȚIONARE

În secundarul transformatorului de curent se montează ampermetre de 5 A sau de 1 A, sau circuite de curent ale altor aparate; toate acestea au o impedanță foarte mică. Din acest motiv, regimul normal de funcționare al transformatorului de curent este asemănător cu regimul de scurtcircuit al transformatoarelor de forță.

Fluxul magnetic al transformatorului este creat de curenții care trec prin cele două înfășurări. Fluxul magnetic creat de înfășurarea primară este proporțional cu intensitatea curentului I_1 și cu numărul de spire N_1. Fluxul magnetic creat de înfășurarea secundară este proporțional cu intensitatea curentului I_2 și cu numărul de spire N_2. Din însumarea celor două fluxuri, se obține un flux rezultant Φ.

La transformatoarele de curent, în funcție de valorile impedanței secundare Z_2 și ale intensității curentului primar I_1 se disting următoarele regimuri de funcționare: *regim normal* și *regim de avarie*.

● **Regim normal**: $Z_s \leqslant Z_{sn}$ ($\cos \varphi \geqslant 0{,}8$) și $I_1 = (0{,}1 \ldots 1{,}20)\ I_{1n}$, Z_{sn} și I_{1n} fiind valorile nominale ale impedanței secundare și respectiv curentului primar. În aceste condiții, atît fluxul creat de înfășurarea primară, cît și fluxul creat de înfășurarea secundară, sînt mari, dar fiind de sens contrar ele se compensează astfel încît fluxul rezultant Φ este mic. În acest caz, transformatorul funcționează normal.

Fluxul primar și fluxul secundar fiind aproximativ egale, se poate scrie:

$$N_1 I_1 \cong N_2 I_2,$$

de unde:

$$\frac{I_1}{I_2} \cong \frac{N_2}{N_1}.$$

De obicei $I_1 > I_2$ și ca urmare $N_1 < N_2$. În cazul curenților I_1 foarte mari, N_1 se poate reduce la o singură spiră.

● **Regim de avarie**: $I_1 \neq 0$ și $Z_s = \infty$. Această situație poate să apară cînd secundarul rămîne deschis. Astfel $I_2 = 0$ și fluxul rezultant crește foarte mult, devenind egal cu fluxul creat de înfășurarea primară (avînd în vedere valoarea mare a intensității curentului I_1, acest flux este foarte mare). Odată cu creșterea fluxului rezultant, cresc foarte mult pierderile în fier, ceea ce face ca miezul magnetic să se încălzească, iar tensiunea la bornele înfășurării secundare crește și ea foarte mult, putînd deveni periculoasă pentru personalul de deservire. Pentru a evita regimul de avarie, este necesar ca transformatoarele de curent să aibă montate în secundar impedanțe mici (ampermetre sau circuite de curent ale altor aparate de măsurat ca: wattmetre, varmetre, contoare), iar în cazul în care acestea lipsesc, bornele înfășurării secundare să fie legate în scurtcircuit.

2. MARCAREA BORNELOR ȘI MONTAREA ÎN CIRCUIT

Pentru conectarea corectă a transformatorului de curent în circuitul de măsurare, bornele sale sînt marcate de regulă cu literele P_1, P_2 (sau K,L) pentru înfășurarea primară și S_1, S_2 (sau k, l) pentru înfășurarea secundară (v. fig. 1.2). La montare, borna P_1 (sau K) se leagă spre sursă, iar S_1 (sau k) — la bornele polarizate ale aparatelor de măsurat (în cazul wattmetrelor, contoarelor etc.).

În figurile 1.3,*a* și 1.3,*b* este reprezentată conectarea transformatoarelor de curent în circuit.

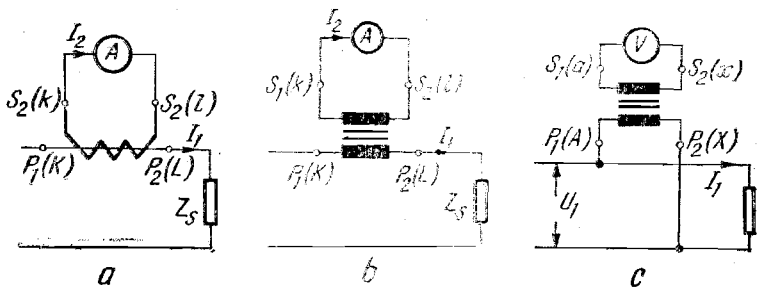


Fig. 1.3. Montarea transformatoarelor de măsurat:
a, *b* — transformatoare de curent; *c* — transformator de tensiune.

3. ERORI. CLASE DE PRECIZIE

La utilizarea transformatoarelor de curent în măsurări, intervin unele erori specifice, cunoscute sub numele de *eroare de curent* și *eroare de unghi*.

● **Eroarea de curent** intervine ca urmare a diferențelor ce apar între valoarea intensității curentului I_1 măsurată prin intermediul transformatorului și valoarea reală a intensității aceluiași curent.

Pentru determinarea valorii intensității curentului măsurat prin intermediul unui transformator de curent, se utilizează *raportul nominal de transformare*, între valorile nominale ale intensităților curenților I_{1n} și I_{2n}:

$$K_{In} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}. \tag{1.5}$$

Raportul nominal este determinat prin construcție și este înscris pe carcasa transformatorului.

Valoarea intensității curentului măsurat se va calcula cu relația:

$$I_{1m} = I_2 \cdot K_{In}, \tag{1.6}$$

unde I_2 este intensitatea curentului, citită la ampermetrul montat în secundarul transformatorului.

Trebuie definit însă și *raportul real de transformare*, adică raportul valorilor efective ale intensităților curenților I_1 și I_2 din primarul și respectiv secundarul transformatorului de curent. El se notează cu K_I:

$$K_I = \frac{I_1}{I_2}. \tag{1.7}$$

Acest raport nu este constant, el putînd fi influențat de valoarea intensității curentului I_1 și de condițiile de funcționare a transformatorului.

Eroarea de curent este rezultatul inegalității raportului de transformare nominal cu raportul de transformare real. Ea reprezintă eroarea relativă cu care se măsoară intensitatea curentului din primarul transformatorului:

$$\varepsilon_I = \frac{I_{1m} - I_1}{I_1} = \frac{K_{In}I_2 - K_I I_2}{K_I I_2} = \frac{K_{In} - K_I}{K_I}. \tag{1.8}$$

● **Eroarea de unghi** δ_I se definește ca fiind egală cu unghiul de defazaj între curentul I_1 și curentul I_2 luat cu semn schimbat (fig. 1.4,*a*).

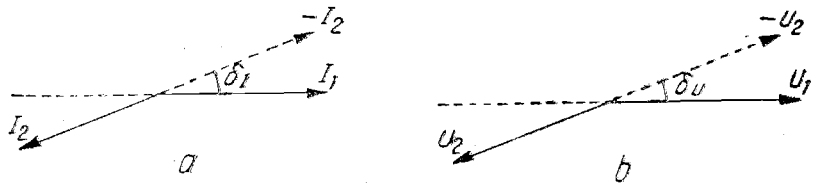


Fig. 1.4. Erori de unghi:
a — la transformatoare de curent; *b* — la transformatoare de tensiune.

Prezența erorii de unghi arată că în cazurile reale defazajul între curenții I_1 și I_2 nu este de 180°, ca în cazul ideal.

Eroarea de unghi nu afectează indicațiile ampermetrelor, dar introduce erori în indicațiile wattmetrelor, contoarelor și ale altor aparate, la care indicația depinde de defazajul curenților din circuitele lor.

● **Clase de precizie.** În funcție de erorile de curent și de unghi se definesc clasele de precizie ale transformatoarelor de curent, conform STAS 4324-70. Se construiesc *transformatoare de curent industriale*, având clasele de precizie 0,2; 0,5; 1 și 3 și *transformatoare de laborator*, având clasele de precizie 0,1; 0,5; 0,02 și 0,01.

4. TIPURI CONSTRUCTIVE

Există un număr foarte mare de tipuri și forme constructive de transformatoare de curent. Ele se construiesc fie ca transformatoare industriale, fie ca transformatoare de laborator.

În țara noastră, la uzina Electroputere din Craiova, se construiesc transformatoare de curent pentru tensiuni de la 0,5 la 400 kV și pentru curenți primari nominali de la 5 la 5 000 A.

● **Transformatoarele industriale** se realizează ca transformatoare portative de *tip cleşte* (fig. 1.5,*a*) sau ca transformatoare fixe *tip suport* (fig. 1.5,*b*) cînd se montează pe console, și de *tip bară* (numite și transformatoare de trecere—fig. 1.5,*c*) cînd înfășurarea primară este realizată chiar de bara prin care trece curentul de măsurat. Transformatoarele destinate funcționării la tensiuni de peste 10 kV au de regulă două sau trei înfășurări secundare, una de măsurare, iar celelalte pentru protecție.

● **Transformatoarele de laborator** au de obicei mai multe intervale de măsurare, obținute prin modificarea numărului de spire (fig. 1.5,*d*).

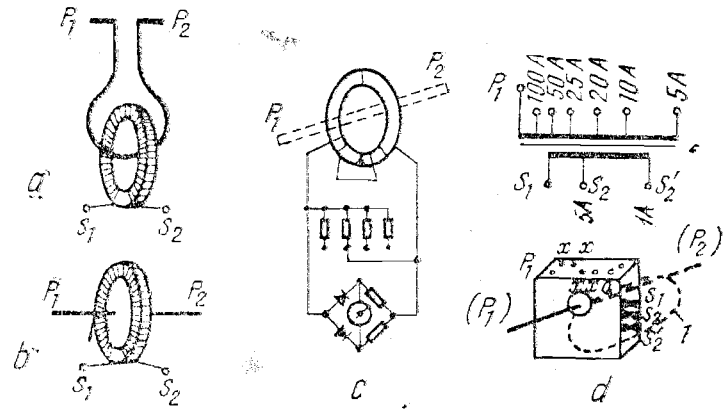


Fig. 1.5. Tipuri constructive de transformatoare de curent:
a — tip suport; *b* — tip bară; *c* — tip cleşte; *d* — de laborator.

B. TRANSFORMATOARE DE TENSIUNE

Pentru măsurarea tensiunilor alternative ce depășesc 100 V, ajungînd la 400 kV, se folosesc voltmetre de 100 V sau 110 V împreună cu transformatoare de tensiune.

1. FUNCȚIONARE

În cazul transformatoarelor de tensiune (fig. 1.6) $U_1 > U_2$ și, conform relației (1.4), $N_1 > N_2$. De această dată, înfășurarea primară are un număr mare de spire.

În secundarul transformatorului de tensiune se conectează voltmetre de 100 V sau de 110 V, sau circuite de tensiune ale altor aparate

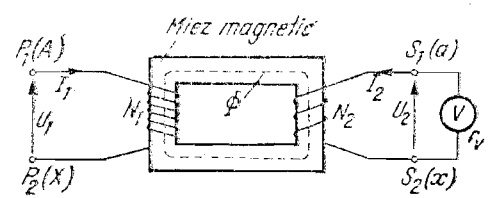


Fig. 1.6. Transformator de tensiune.

(wattmetre, contoare etc.). Toate acestea prezintă o impedanță foarte mare, deci regimul de funcționare al transformatoarelor de tensiune este asemănător cu regimul de mers în gol al transformatoarelor de forță.

În cazul cînd circuitul secundar este deschis (în gol), curentul absorbit de primar este curentul de mers în gol I_{10} necesar producerii fluxului magnetic Φ_0. Dacă în circuitul secundar se conectează o impedanță mare, cum sînt impedanțele circuitelor de tensiune ale aparatelor de măsurat, curentul secundar I_2 deși mic ca valoare produce un flux de semn contrar fluxului creat de primar și fluxul total tinde să scadă. În acest caz, curentul din primar va crește pînă la valoarea I_1, care restabilește echilibrul, astfel încît fluxul în miezul magnetic rămîne aproape constant ($\Phi \cong \Phi_0$).

În cazul transformatorului de tensiune, curenții fiind mici și producînd căderi de tensiune neglijabile în înfășurări, se menține cu o bună aproximație relația de proporționalitate între tensiuni și numerele corespunzătoare de spire:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

2. MARCAREA BORNELOR ȘI MONTAREA ÎN CIRCUIT

Pentru conectarea corectă a transformatoarelor de tensiune în circuitele de măsurare, bornele sînt marcate de regulă cu P_1, P_2 (sau A, X) pentru înfășurarea primară și cu S_1, S_2 (sau a, x) pentru înfășurarea secundară. În cazul transformatoarelor trifazate, bornele primare se notează cu A, B, C pentru începuturile înfășurărilor și cu X, Y, Z pentru sfîrșiturile înfășurărilor, iar pentru bornele secundare se notează cu a, b, c începuturile înfășurărilor și cu x, y, z sfîrșiturile înfășurărilor; punctul neutru se notează cu N în primar și cu n în secundar.

La conectarea transformatoarelor de tensiune în circuit, bornele P (sau A, B, C) se leagă spre sursă, iar bornele S (sau a, b, c) se leagă la bornele polarizate ale aparatelor de măsurat (în cazul wattmetrelor, contoarelor etc.), așa cum arată și figura 1.3, *c*.

3. ERORI, CLASE DE PRECIZIE

Ca și la utilizarea transformatoarelor de curent, și la utilizarea transformatoarelor de tensiune intervin erori specifice, cunoscute sub numele de *eroare de tensiune* și *eroare de unghi*.

● **Eroarea de tensiune** intervine datorită faptului că valoarea tensiunii măsurate prin intermediul transformatorului, U_{1m}, poate fi diferită de valoarea reală U_1 a tensiunii.

Pentru determinarea valorii tensiunii măsurate prin intermediul transformatorului se utilizează *raportul nominal de transformare*, între valorile nominale ale tensiunilor U_{1n} și U_{2n}:

$$K_{Un} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}. \tag{1.9}$$

Raportul nominal de transformare este determinat prin construcție și este înscris pe transformator.

Valoarea tensiunii măsurate se calculează cu relația:

$$U_{1m} = U_2 K_{Un}, \tag{1.10}$$

unde U_2 este tensiune citită la voltmetrul montat în secundarul transformatorului.

Raportul valorilor efective ale tensiunilor U_1 și U_2 din primarul și respectiv secundarul transformatorului de tensiune, se numește *raport real de transformare* și se notează cu K_U:

$$K_U = \frac{U_1}{U_2}. \tag{1.11}$$

Acest raport nu este constant, el putînd fi influențat de condițiile de funcționare ale transformatorului.

Inegalitatea raportului de transformare nominal cu raportul de transformare real conduce la apariția de erori. Eroarea relativă cu care se măsoară tensiunea din primarul transformatorului se numește eroare de tensiune și este dată de relația:

$$\varepsilon_U = \frac{U_{1m} - U_1}{U_1} = \frac{K_{Un}U_2 - K_U U_2}{K_U U_2} = \frac{K_{Un} - K_U}{K_U}. \tag{1.12}$$

● **Eroarea de unghi** este egală cu unghiul de defazaj între tensiunea U_1 și tensiunea U_2 luată cu semn schimbat (fig. 1.4, *b*). Eroarea de unghi indică faptul că în cazurile reale defazajul dintre tensiunile U_1 și U_2 nu este de 180°, ca în cazul ideal. Eroarea de unghi nu afectează indicațiile voltmetrelor, dar introduce erori în indicațiile wattmetrelor, contoarelor, fazmetrelor etc.

● **Clase de precizie.** În funcție de erorile de tensiune și de unghi se definesc clasele de precizie ale transformatoarelor de tensiune, conform STAS 4323-70. Se construiesc transformatoare de tensiune industriale, avînd clasele 0,2; 0,5; 1 și 3, și transformatoare de laborator avînd clasele 0,1; 0,05; 0,02 și 0,01.

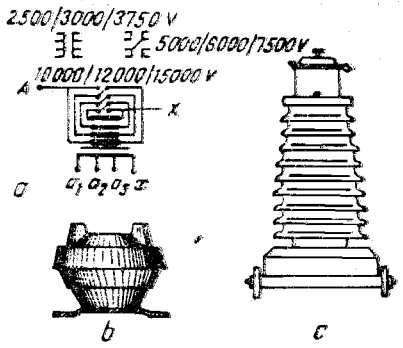


Fig. 1.7. Transformatoare de tensiune:
a — schema unui transformator de laborator; *b* — transformator izolat în rășini; *c* — transformator izolat în porțelan.

Transformatoarele de tensiune se realizează ca transformatoare industriale sau de laborator.

În țara noastră, la uzina Electroputere din Craiova, se construiesc transformatoare de tensiune cu tensiuni nominale pînă la 400 kV.

● **Tipurile industriale de transformatoare de tensiune** pot fi *de interior* sau *de exterior*, monofazate sau trifazate, cu izolație de ulei, porțelan, rășini sau aer (fig. 1.7). Se construiesc de obicei cei cu două sau trei înfășurări secundare, una de măsurare și celelalte de protecție.

● **Transformatoarele de laborator** au mai multe intervale de măsurare, care se comută prin modificarea conexiunilor unor prize din primar sau secundar.

Probleme și întrebări recapitulative

1. Care sînt avantajele utilizării transformatoarelor de măsurat?
2. Cît este numărul de spire din primarul unui transformator de tip bară?
3. Care sînt pericolele ce pot interveni în cazul unui transformator de curent care rămîne cu secundarul deschis?
4. La măsurarea intensității unui curent prin intermediul unui transformator de curent, ampermetrul din secundar indică 2,75 A, iar $K_{In} = 80$. Cît este intensitatea curentului măsurat?
5. La măsurarea unei tensiuni prin intermediul unui transformator de tensiune, voltmetrul din secundar indică 75 V, iar $K_{Un} = 100$. Cît este valoarea tensiunii măsurate?
6. La măsurarea unei puteri prin intermediul unor transformatoare de tensiune și de curent (fig. 1.3, *c*), wattmetrul montat în cele două secundare indică 200 W. Dacă $K_{Un} = 100$ și $K_{In} = 80$, cît este puterea măsurată?
7. De ce eroarea de unghi nu afectează indicațiile ampermetrelor și voltmetrelor?

CAPITOLUL 2

MĂSURAREA PUTERII ȘI ENERGIEI ELECTRICE ÎN CIRCUITE DE CURENT ALTERNATIV TRIFAZATE

Pentru transmiterea de puteri mari în curent alternativ, se folosesc exclusiv circuite trifazate. Un circuit trifazat poate fi considerat ca suprapunerea a trei circuite monofazate (fig.2.1) la care cele trei conductoare de întoarcere au fost înlocuite cu unul singur (*circuit trifazat cu conductor neutru*) sau au fost suprimate (*circuit trifazat fără conductor neutru*). Suprimarea conductorului de întoarcere este posibilă deoarece suma valorilor instantanee ale celor trei curenți (în regim simetric echilibrat) este nulă.

Curenții și tensiunile care caracterizează un circuit trifazat (fig.2.2) sînt:

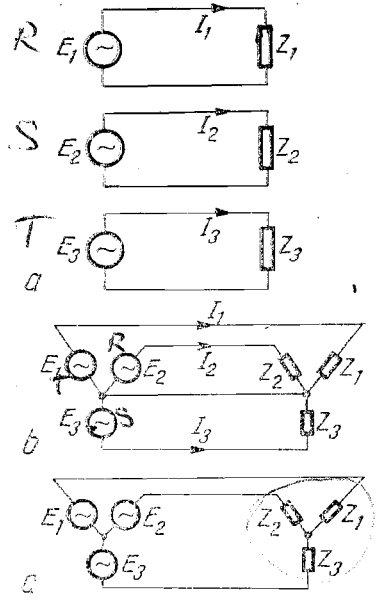


Fig. 2.1. Principiul transmiterii energiei:
a — circuite monofazate separate; *b* — circuite trifazate.

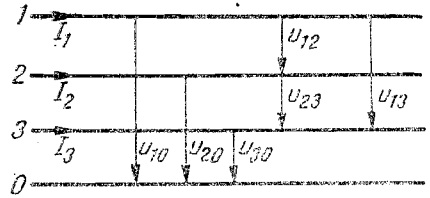


Fig. 2.2. Tensiunile și curenții într-un circuit trifazat.

— *curenții de linie* I_1, I_2, I_3, care circulă prin cele trei conductoare ale liniei;

— *tensiunile de linie* U_{12}, U_{23}, U_{31}, între cîte două dintre cele trei conductoare ale liniei;

— *tensiunile de fază* U_{10}, U_{20}, U_{30}, între fiecare dintre cele trei conductoare și conductorul neutru.

În cazul unui circuit trifazat simetric, tensiunile sînt egale și defazate între ele cu cîte 120°. Din diagrama fazorială a tensiunilor (fig.2.3),

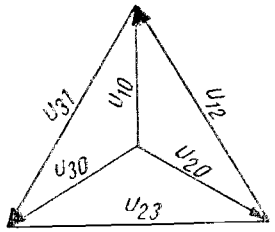


Fig. 2.3. Diagrama fazorială a tensiunilor de linie și de fază.

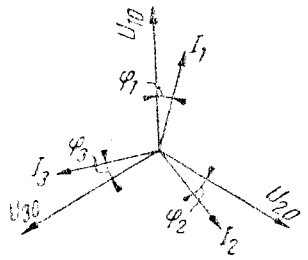


Fig. 2.4. Diagrama fazorială a curenților și tensiunilor într-un circuit trifazat.

se poate deduce că la un circuit trifazat simetric tensiunile de linie sînt de $\sqrt{3}$ ori mai mari decît tensiunile de fază.

Un circuit trifazat simetric este și echilibrat dacă, pe lîngă egalitatea tensiunilor, sînt egali și cei trei curenți I_1, I_2, I_3 și, de asemenea, și cele trei defazaje φ_1, φ_2, φ_3 (fig.2.4).

A. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CIRCUITE TRIFAZATE

Puterea activă transmisă pe o linie trifazată se poate considera ca fiind egală cu suma puterilor active pe cele trei faze, deci se poate scrie:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \tag{2.1}$$

sau

$$P = U_{10} I_1 \cos \widehat{U_{10} I_1} + U_{20} I_2 \cos \widehat{U_{20} I_2} + U_{30} I_3 \cos \widehat{U_{30} I_3}. \tag{2.2}$$

Pentru măsurarea puterii active se folosesc wattmetre electrodinamice sau ferodinamice, în diferite montaje.

1. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CIRCUITE TRIFAZATE CU CONDUCTOR NEUTRU

● **În cazul general, al circuitelor trifazate nesimetrice și neechilibrate, cu conductor neutru**, puterea activă se măsoară cu trei wattmetre, montate cu bobinele de curent pe fiecare fază și cu bobinele de tensiune legate între cîte o fază și conductorul neutru (fig.2.5). Cele trei wattmetre, W_1, W_2 și W_3, vor indica:

$$\begin{aligned} P_{W1} &= U_{10} I_1 \cos \widehat{U_{10} I_1} = P_1; \\ P_{W2} &= U_{20} I_2 \cos \widehat{U_{20} I_2} = P_2; \\ P_{W3} &= U_{30} I_3 \cos \widehat{U_{30} I_3} = P_3. \end{aligned} \tag{2.3}$$

Conform relațiilor (2.3), fiecare dintre cele trei wattmetre măsoară puterea activă consumată pe faza respectivă. Puterea activă totală va fi egală cu suma puterilor indicate de cele trei wattmetre:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = P_1 + P_2 + P_3. \tag{2.4}$$

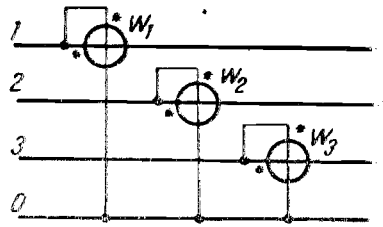


Fig. 2.5. Măsurarea puterii active în circuite trifazate cu conductor neutru.

● **Observație.** Pentru măsurarea directă a puterii trifazate se pot folosi și *wattmetre trifazate*, cu trei dispozitive de măsurat, la care cele trei bobine de tensiune sînt fixate pe același ax, asupra căruia acționează toate cele trei cupluri: aceste cupluri se însumează, astfel că indicațiile sînt proporționale cu puterea trifazată.

● **În circuitele simetrice și echilibrate** $U_{10} = U_{20} = U_{30}$, $I_1 = I_2 = I_3$, $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$ și ca urmare $P_1 = P_2 = P_3$. În acest caz puterea activă se poate măsura cu un singur wattmetru montat cu bobina de curent pe una dintre faze și cu bobina de tensiune între faza respectivă și conductrul neutru. Puterea activă trifazată va fi:

$$P = 3P_W = 3\,P_f, \tag{2.4'}$$

unde P_W este puterea indicată de wattmetru, iar P_f — puterea activă pe o fază.

2. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE ÎN CIRCUITE TRIFAZATE FĂRĂ CONDUCTOR NEUTRU

a. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE TRIFAZATE CU TREI WATTMETRE

● **În cazul în care circuitul trifazat este fără conductor neutru, dar punctul neutru al consumatorului este accesibil,** măsurarea puteri active se poate face cu trei wattmetre conectate fiecare cu bobina de curent pe cîte o fază și cu bobina de tensiune între faza respectivă și punctul neutru al consumatorului (fig.2.6). Situația este asemănătoare cu cea din cazul rețelelor cu conductor neutru, fiecare wattmetru măsurînd puterea activă pe cîte o fază. Puterea activă trifazată va fi egală cu suma puterilor indicate de cele trei wattmetre:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = P_1 + P_2 + P_3.$$

● **Dacă punctul neutru al consumatorului nu este accesibil,** bobinele de tensiune se pot conecta la un punct comun N al cărui potențial poate fi oarecare (fig.2.7). În această situație puterile P_{W1}, P_{W2}, P_{W3} indicate de cele trei wattmetre nu mai sînt egale cu puterile P_1, P_2 și P_3 de pe cele trei faze, dar se poate demonstra că suma algebrică a puterilor indicate de cele trei wattmetre este egală cu puterea activă trifazată, adică:

$$P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = P_1 + P_2 + P_3 = P. \qquad (2.5)$$

Demonstrarea acestei proprietăți se bazează pe faptul că în orice moment $I_1 + I_2 + I_3 = 0$, deci o tensiune comună ΔU adăugată prin schimbarea potențialului punctului comun N rezultă ca factor comun, de forma $\Delta U(I_1 + I_2 + I_3) = 0$. În consecință, puterea totală nu se schimbă.

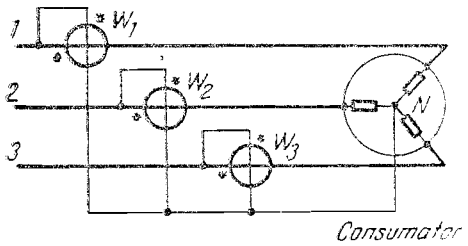


Fig. 2.6. Măsurarea puterii active în circuite trifazate fără conductor neutru, cu punctul neutru al consumatorului accesibil.

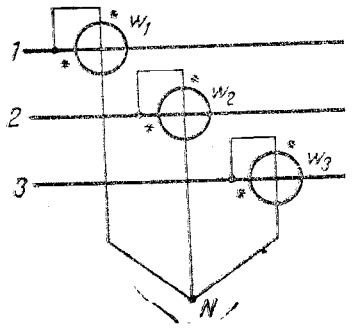


Fig. 2.7. Măsurarea puterii active în circuite trifazate fără conductor neutru, cu trei wattmetre.

În funcție de caracterul consumatorului, unul dintre wattmetre poate să dea indicații negative dacă unghiul dintre tensiunea aplicată bobinei de tensiune și curentul ce trece prin bobina de curent este mai mare de 90°. În acest caz, dacă wattmetrul nu este prevăzut cu un comutator special pentru inversarea sensului curentului prin bobina de tensiune, se inversează legăturile la bornele acestei bobine și în calculul puterii trifazate indicația wattmetrului respectiv se ia cu semnul minus.

b. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE TRIFAZATE CU DOUĂ WATTMETRE

Așa cum s-a arătat, în cazul în care circuitul trifazat este fără conductor neutru bobinele de tensiune se pot lega la un punct comun N oarecare. Dacă punctul comun se plasează pe una dintre cele trei faze, devenită în acest caz fază de referință, wattmetrul de pe faza respectivă va avea indicația nulă, deoarece bobinei sale de tensiune nu i se aplică nici o diferență de potențial. În acest caz, suma algebrică a indicațiilor celorlalte două wattmetre va fi egală cu puterea activă trifazată. Rezultă că se poate renunța la un wattmetru și puterea activă a unui circuit trifazat se poate măsura numai cu două wattmetre, avînd fiecare bobina de curent montată pe cîte o fază, iar bobina de tensiune — montată între faza respectivă și faza de referință.

În funcție de faza de referință aleasă, există trei modalități de montare a celor două wattmetre:

— dacă faza *3* este aleasă ca fază de referință (fig.2.8, *a*), se obține:

$$P = P_{W1} + P_{W2} = U_{13}I_1 \cos \widehat{U_{13}I_1} + U_{23}I_2 \cos \widehat{U_{23}I_2}; \qquad (2.6)$$

— dacă faza *2* ese aleasă ca fază de referință (fig.2.8, *b*), se obține:

$$P = P_{W1} + P_{W3} = U_{12}I_1 \cos \widehat{U_{12}I_1} + U_{32}I_3 \cos \widehat{U_{32}I_3}; \qquad (2.7)$$

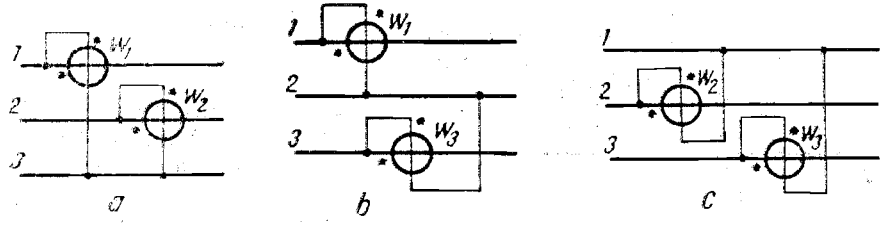


Fig. 2.8. Măsurarea puterii active în circuite trifazate cu două wattmetre: *a* — faza *1* ca referință; *b* — faza *2* ca referință; *c* — faza *3* ca referință.

— dacă faza *1* este aleasă ca fază de referință (fig.2.8, *c*), se obține:

$$P = P_{W2} + P_{W3} = U_{21} I_2 \cos \widehat{U_{21} I_2} + U_{31} I_3 \cos \widehat{U_{31} I_3}. \qquad (2.8)$$

În expresiile de mai sus s-au notat cu P_{W1}, P_{W2}, P_{W3} indicațiile wattmetrelor W_1, W_2, W_3.

În cazul particular al măsurării puterii active cu două wattmetre în circuite simetrice și echilibrate, în care $U_{12} = U_{13} = U_{23} = U$; $I_1 = I_2 = I_3$; $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$ (fig.2.9), dacă se consideră faza *3* ca fază de referință, unghiurile dintre tensiunile aplicate bobinelor de tensiune și curenții prin bobinele de curent sînt: $\widehat{U_{13} I_1} = 30° - \varphi$ și $\widehat{U_{23} I_2} = 30° + \varphi$. Înlocuindu-se aceste valori în expresia (2.6), se obține:

$$P = UI\cos(30° - \varphi) + UI\cos(30° + \varphi) = UI \cdot 2 \cos 30° \cos\varphi =$$

$$= \sqrt{3}\, UI \cos\varphi, \qquad (2.9)$$

adică tocmai puterea activă trifazată ($\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}$ și tensiunea de fază este de $\sqrt{3}$ ori mai mare decît tensiunea de linie).

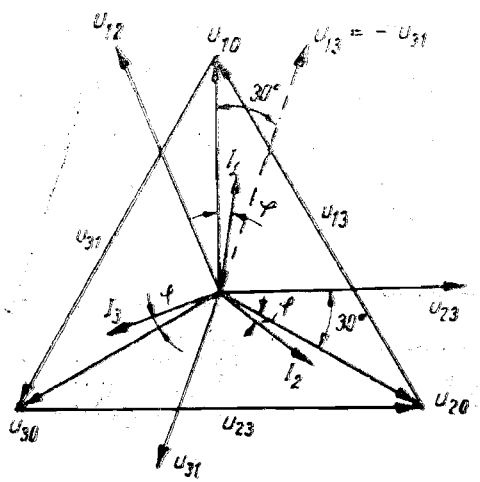


Fig. 2.9. Diagrama tensiunilor și curenților într-un circuit trifazat simetric și echilibrat.

Măsurarea puterii active trifazate cu schema celor două wattmetre se poate realiza și cu un singur wattmetru conectat succesiv, fără a întrerupe circuitul, pe două dintre fazele circuitului trifazat, cu ajutorul unui comutator wattmetric special.

○ **Observație.** Pentru o măsurare mai comodă se construiesc wattmetre trifazate, care constau din două dispozitive de măsurat montate conform schemei celor două wattmetre. Bobinele de tensiune ale celor două dispozitive de măsurat sînt fixate pe același ax, astfel încît cuplurile lor active se însumează.

Schema de măsurare cu două wattmetre este cea mai utilizată pentru măsurarea puterii active trifazate în circuite fără conductor neutru, deoarece prezintă avantajul că poate fi utilizată și în circuite nesimetrice și neechilibrate și necesită numai două aparate de măsurat.

c. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE TRIFAZATE CU UN WATTMETRU

Pentru măsurarea puterii active trifazate *în circuite simetrice și echilibrate fără conductor neutru*, se poate folosi un singur wattmetru montat cu bobina de curent pe una dintre faze și cu bobina de tensiune între faza respectivă și un punct neutru N creat artificial cu ajutorul a două rezistențe adiționale R_2 și R_3 egale cu rezistența circuitului de tensiune al wattmetrului (fig.2.10). Valoarea puterii active trifazate P se obține înmulțind cu 3 indicația P_W a wattmetrului ($P = 3\, P_W$). Dacă wattmetrul este destinat să funcționeze permanent în circuite trifazate echilibrate, scara sa se poate grada direct în valori ale puterii active trifazate.

3. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE TRIFAZATE PRIN INTERMEDIUL TRANSFORMATOARELOR DE MĂSURAT

În circuitele trifazate în care tensiunile și curenții depășesc valorile nominale ale wattmetrelor, măsurarea puterii se efectuează prin intermediul **transformatoarelor de măsurat**. În figura 2.11 este reprezentată schema

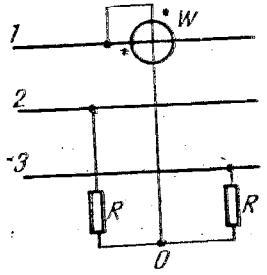


Fig. 2.10. Măsurarea puterii active în circuite trifazate fără conductor neutru, cu un wattmetru.

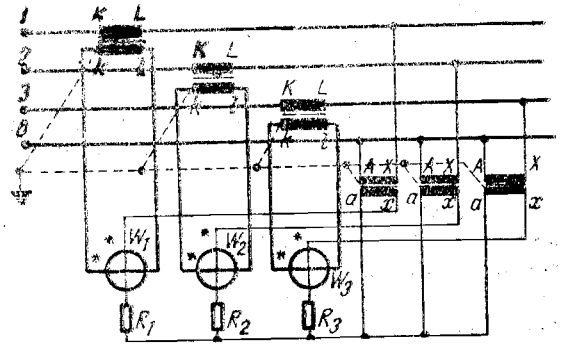


Fig. 2.11. Măsurarea puterii active în circuite trifazate cu conductor neutru prin intermediul transformatoarelor de măsurat.

de montare a trei wattmetre prin intermediul transformatoarelor de măsurat, pentru un circuit trifazat cu conductor neutru.

Pentru protecția wattmetrelor și a operatorilor, cîte un capăt al tuturor înfășurărilor secundare (atît la transformatoarele de tensiune, cît și la cele de curent) se leagă la pămînt.

Wattmetrele conectate prin intermediul transformatoarelor de măsurat în instalațiile fixe sînt gradate direct în puterea de măsurat, ținînd seama de rapoartele de transformare respective, deci valoarea citită nu mai trebuie înmulțită cu K_{Un} și K_{In}. Se întîlnesc frecvent wattmetre gradate în kilowați sau megawați, purtînd denumirea de kilowattmetre sau megawattmetre.

B. MĂSURAREA PUTERII REACTIVE ÎN CIRCUITE TRIFAZATE

Puterea reactivă este dată de relația:

$$Q = UI \sin \varphi. \tag{2.10}$$

În circuite trifazate, puterea reactivă totală (trifazată) este egală cu suma puterilor reactive de pe cele trei faze:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = U_{10}I_1 \sin \widehat{U_{10}I_1} + U_{20}I_2 \sin \widehat{U_{20}I_2} + \\ + U_{30}I_3 \sin \widehat{U_{30}I_3}. \tag{2.11}$$

Măsurarea puterii reactive trifazate se poate face direct *cu varmetre*, sau indirect *cu wattmetre*.

1. MASURAREA PUTERII REACTIVE TRIFAZATE CU VARMETRE

Varmetrele sînt *aparate electrodinamice sau ferodinamice în care se creează un defazaj de 90° între curentul prin bobina mobilă și tensiunea aplicată acesteia, montîndu-i în serie o bobină sau un condensator în loc de rezistență adițională*. În acest caz, aparatele vor indica direct puterea reactivă.

Măsurarea puterii reactive cu varmetre se realizează cu aceleași montaje ca în cazul măsurării puterii active cu wattmetre. Ele se folosesc mai des în circuite monofazate și mai rar în cele trifazate.

2. MĂSURAREA PUTERII ACTIVE TRIFAZATE CU WATTMETRE

Puterea reactivă se poate măsura direct și cu wattmetre, dacă prin bobina de curent trece curentul I, iar bobinei de tensiune i se aplică o tensiune auxiliară U', proporțională și de aceeași frecvență cu tensiunea U de măsurat, dar defazată cu 90° în urma acesteia. În acest caz, între curentul I și tensiunea auxiliară U' există un defazaj de $90° - \varphi$ și indicația P_W a wattmetrului va fi:

$$P_W = U'I \cos (90° - \varphi) = U'I \sin \varphi = \frac{U'}{U} UI \sin \varphi = \frac{U'}{U} Q, \tag{2.12}$$

de unde:

$$Q = \frac{U}{U'} P_W. \tag{2.13}$$

În circuitele trifazate simetrice se poate aplica această metodă, deoarece tensiunea dintre două faze este defazată cu 90° în urma tensiunii de pe cealaltă fază (fig.2.12, *b*). Astfel, tensiunea U_{23} este defazată cu 90° în urma tensiunii U_{10}, tensiunea U_{31} este defazată cu 90° în urma tensiunii U_{20} și tensiunea U_{12} este defazată cu 90° în urma tensiunii U_{30}.

● Folosind tensiunile între faze ca tensiuni auxiliare, se poate măsura puterea reactivă trifazată **cu trei wattmetre** montate cu bobinele de curent pe cîte o fază și bobinele de tensiune legate între celelalte două faze (fig.2.12, *a*). Avînd în vedere că raportul între tensiunea auxi-

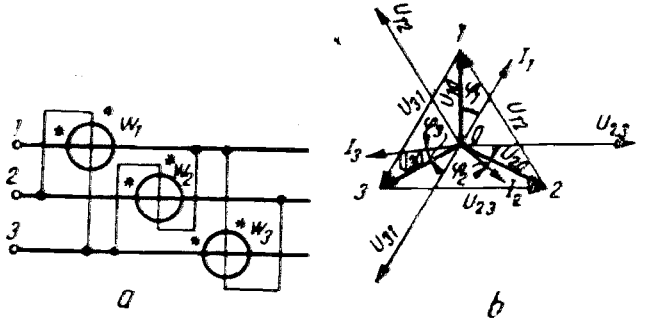


Fig. 2.12. Măsurarea puterii reactive în circuite trifazate, cu trei wattmetre.

liară (tensiunea între faze) și tensiunea de fază este $U'/U = \sqrt{3}$, cele trei wattmetre, W_1, W_2 și W_3 vor indica:

$$P_{W1} = U_{23} I_1 \cos \widehat{U_{23} I_1} = \frac{U_{23}}{U_{10}} U_{10} I_1 \sin \widehat{U_{10} I_1} = \sqrt{3}\, Q_1; \quad (2.14)$$

$$P_{W2} = U_{31} I_2 \cos \widehat{U_{31} I_2} = \frac{U_{31}}{U_{20}} U_{20} I_2 \sin \widehat{U_{20} I_2} = \sqrt{3}\, Q_2; \quad (2.15)$$

$$P_{W3} = U_{12} I_3 \cos \widehat{U_{12} I_3} = \frac{U_{12}}{U_{30}} U_{30} I_3 \sin \widehat{U_{30} I_3} = \sqrt{3}\, Q_3. \quad (2.16)$$

Suma puterilor măsurate de cele trei wattmetre va fi :

$$P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = \sqrt{3}\,(Q_1 + Q_2 + Q_3) = \sqrt{3}\, Q, \quad (2.17)$$

de unde:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}). \quad (2.18)$$

● În circuite trifazate simetrice puterea reactivă se poate măsura și numai **cu două wattmetre**, la fel ca în cazul puterii active. Luînd faza a treia ca fază de referință, se poate scrie:

$$Q = U_{13} I_1 \sin \widehat{U_{13} I_1} + U_{23} I_2 \sin \widehat{U_{23} I_2}. \quad (2.19)$$

Tensiunile auxiliare defazate cu 90° în urma tensiunilor U_{12} și U_{23} sînt U_{20} și, respectiv, $-U_{10}$ (fig.2.13, *b*). Montînd cele două wattmetre cu bobinele de curent pe fazele *1* și *2* și aplicînd bobinelor de tensiune ale wattmetrelor tensiunile U_{20} și $-U_{10}$ (fig.2.13, *a*), acestea vor indica:

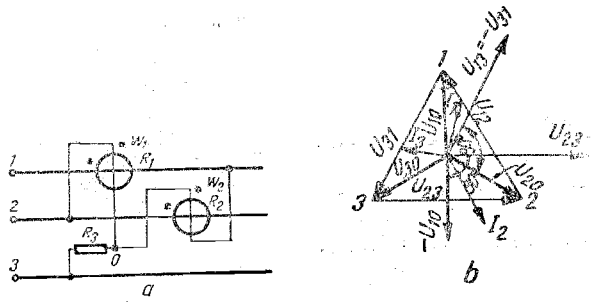


Fig. 2.13. Măsurarea puterii reactive în circuite trifazate, cu două wattmetre.

$$P_{W1} = U_{20} I_1 \cos \widehat{U_{20} I_1} = \frac{U_{20}}{U_{13}} U_{13} I_1 \sin \widehat{U_{13} I_1}; \quad (2.20)$$

$$P_{W2} = U_{10} I_2 \cos (-\widehat{U_{10} I_2}) = \frac{U_{10}}{U_{23}} U_{23} I_2 \sin \widehat{U_{23} I_2}. \quad (2.21)$$

Știind că raportul între tensiunea de fază și tensiunea dintre faze este $\frac{1}{\sqrt{3}}$, suma puterilor indicate de cele două wattmetre va fi:

$$P_{W1} + P_{W2} = \frac{1}{\sqrt{3}} Q, \quad (2.22)$$

de unde:

$$Q = \sqrt{3}\,(P_{W1} + P_{W2}). \quad (2.23)$$

Pentru a putea aplica bobinelor de tensiune ale wattmetrelor tensiunile de fază U_{20} și $-U_{10}$, se creează un punct neutru artificial *0* cu ajutorul unei rezistențe R_3 de valoare egală cu rezistența circuitelor de tensiune ale celor două wattmetre.

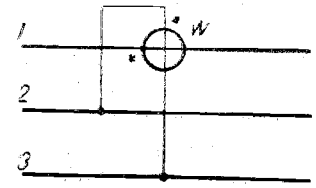


Fig. 2.14. Măsurarea puterii reactive în circuite trifazate, cu un wattmetru.

● Dacă circuitul trifazat simetric este și echilibrat, puterea reactivă se poate măsura și numai **cu un singur wattmetru** (fig.2.14). Dacă indicația wattmetrului este P_W, puterea reactivă trifazată va fi:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} 3\, P_W = \sqrt{3}\, P_W. \quad (2.24)$$

C. MĂSURAREA ENERGIEI ELECTRICE ÎN CIRCUITE TRIFAZATE

1. MĂSURAREA ENERGIEI ACTIVE

Măsurarea energiei active în circuitele trifazate se poate efectua cu *contoare de inducție monofazate* sau *trifazate*. În primul caz, utilizat mai rar, se folosesc două sau trei contoare monofazate montate după schema celor două wattmetre sau după schema celor trei wattmetre de la măsurarea puterii active. Energia totală se obține prin însumarea energiilor înregistrate de fiecare contor separat.

Contoarele trifazate conțin în același aparat două sau trei sisteme active, avînd fiecare cîte un electromagnet de curent și cîte unul de tensiune, ale căror cupluri active acționează asupra aceluiași ax, astfel încît cuplul activ total este proporțional cu puterea activă trifazată, iar contorul înregistrează energia activă totală, trifazată.

În circuitele trifazate fără conductor neutru se utilizează contoare cu două sisteme active, montate după metoda celor două wattmetre, iar *în circuitele cu conductor neutru* se utilizează de obicei contoare trifazate cu trei sisteme active montate după schema celor trei wattmetre.

2. MĂSURAREA ENERGIEI REACTIVE

Pentru măsurarea energiei reactive se utilizează contoare de energie reactivă realizate, ca și varmetrele trifazate, cu ajutorul unor tensiuni auxiliare.

În cazul cînd curentul sau tensiunea de utilizare depășește valorile nominale pentru care sînt construite contoarele, acestea se montează în circuitele secundare ale transformatoarelor de măsurat.

În țara noastră se construiesc contoare de inducție monofazate și trifazate la „Întreprinderea de aparate electrice de măsurat" din Timișoara.

Probleme și întrebări recapitulative

1. Care este cel mai avantajos montaj pentru măsurarea puterii active trifazate într-un circuit simetric și echilibrat? Dar într-un circuit neechilibrat?
2. Cu care dintre montajele studiate se pot determina puterile active pe fiecare fază în parte?
3. Într-un circuit trifazat fără conductor neutru este posibil să se cunoască puterile active pe fiecare fază?
4. În ce condiții se poate măsura puterea activă trifazată cu un singur wattmetru monofazat?
5. Explicați posibilitatea măsurării puterii active trifazate numai cu două wattmetre!
6. Într-un circuit trifazat simetric și echilibrat, un wattmetru montat cu bobina de curent pe faza 1 și cu bobina de tensiune între fazele 1 și 3 indică o putere de 700 W. Cît este puterea activă trifazată?
7. Care este principiul măsurării directe a puterii reactive cu ajutorul wattmetrelor?
8. Ce măsură de protecție se prevede la măsurarea puterilor prin intermediul transformatoarelor de măsurat?

CAPITOLUL 3

MĂSURAREA PUTERII ELECTRICE ÎN CIRCUITE ELECTRONICE

Măsurarea puterii electrice în circuite electronice prezintă unele particularități, cum ar fi:

— funcționarea circuitelor electronice într-o bandă largă de frecvențe (0 — gigaherți);

— sarcina în care se consumă puterea electrică este de obicei o impedanță, ea prezentînd pe lîngă rezistență și o reactanță;

— puterile ce urmează să se măsoare au o gamă largă de valori (de la microwați la kilowați).

Aparatele și metodele utilizate la măsurarea puterilor în circuitele electrice nu mai sînt suficiente. După cum se știe, wattmetrele electrodinamice și ferodinamice nu funcționează corect decît pînă la cîteva sute de herți, iar sensibilitatea lor nu permite măsurarea puterilor foarte mici. Din aceste motive, la măsurarea puterii în circuitele electronice se folosesc alte tipuri de aparate și metode de măsurare, cum sînt:

— măsurarea tensiunii sau intensității curentului pe o rezistență de valoare cunoscută (*metoda sarcinii artificiale, wattmetrul de ieșire*);

— wattmetre care pot funcționa la frecvențe înalte (*wattmetrul cu termocupluri*);

— transformarea energiei electromagnetice în alte forme de energie măsurabilă (*metoda fotometrică, metode calorimetrice*).

A. DETERMINAREA PUTERII PRIN MĂSURAREA TENSIUNII SAU INTENSITĂȚII CURENTULUI PE O REZISTENȚĂ DE VALOARE CUNOSCUTĂ

1. METODA SARCINII ARTIFICIALE

Metoda sarcinii artificiale este o *metodă indirectă* și se bazează pe relațiile ce definesc puterea electrică consumată de o rezistență:

$$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}. \qquad (3.1)$$

Dearece sarcinile în care se consumă puterea au de obicei și un caracter reactiv, la măsurarea puterii prin această metodă se înlocuiește sarcina reală (fig.3.1, *a*) cu o sarcină artificială rezistivă, care are aceeași valoare ca și partea reală a impedanței de sarcină. În aceste condiții, se poate măsura intensitatea curentului ce trece prin sarcina artificială

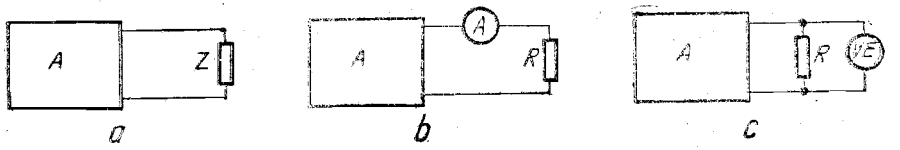


Fig. 3.1. Măsurarea puterii la ieșirea unui amplificator prin metoda sarcinii artificiale.

cu un ampermetru cu termocuplu, care funcționează pînă la sute de megaherți (fig.3.1, *b*) sau căderea de tensiune la bornele sarcinii artificiale — cu un voltmetru electronic (fig.3.1, *c*), pentru ca apoi să se calculeze puterea cu una dintre relațiile (3.1).

Metoda sarcinii artificiale se utilizează la măsurarea puterii de ieșire a amplificatoarelor de putere, la măsurarea puterii de ieșire a radioreceptoarelor sau televizoarelor, la măsurarea puterii debitate de emițătoare în antene etc.

2. WATTMETRUL DE IEȘIRE

Așa cum s-a arătat, puterea se poate determina indirect măsurînd cu un voltmetru tensiunea la bornele unei rezistențe de valoare cunoscută și aplicînd relația:

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Dacă rezistența R este constantă, atunci voltmetrul poate fi etalonat direct în wați, obținîndu-se un aparat care măsoară direct puterea, deci un wattmetru. Acest aparat este foarte simplu, dar are următoarele dezavantaje:

— prezintă o singură impedanță de intrare, deci nu poate fi utilizat pentru orice sarcină;

— prezintă o singură sensibilitate, deci nu poate măsura puteri de diferite valori.

Se poate realiza însă și aparate mai complexe, cunoscute sub denumirea de *wattmetre de ieșire*, care pot avea mai multe intervale de măsurare și pot prezenta diferite impedanțe de intrare.

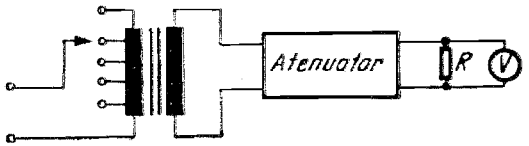


Fig. 3.2. Wattmetru de ieșire cu atenuator și transformator de adaptare.

Wattmetrul de ieșire se conectează în locul impedanței de sarcină, impedanța lui de intrare îndeplinind rolul unei sarcini artificiale. Un exemplu de wattmetre de ieșire este aparatul tip N 300 C produs de firma Ferisol, care are impedanța de intrare variabilă între 2,5Ω și 20 kΩ în 44 de trepte, funcționează în banda de frecvență de la 20 Hz la 15 kHz și măsoară puteri între 15 mW și 15 W.

● Un **wattmetru de ieșire cu mai multe intervale de măsurare** se poate realiza introducîndu-se înaintea ansamblului rezistență-voltmetru un *atenuator în trepte* (fig.3.2). Dacă atenuatorul este bine calculat impedanța de intrare rămîne mereu aceeași.

● **Pentru a se obține diferite impedanțe de intrare,** se pot folosi fie transformatoare, fie cvadripoli de adaptare rezistivi.

La wattmetrele de ieșire cu transformator (fig.3.2), dacă se notează cu Z_1 impedanța de intrare $\left(Z_1 = \frac{U_1}{I_1}\right)$, cu Z_2 impedanța de sarcină $\left(Z_2 = \frac{U_2}{I_2}\right)$ și cu n raportul de transformare $\left(n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}\right)$, în cazul unui transformator ideal se poate scrie:

$$Z_1 = \frac{1}{n^2} Z_2. \qquad (3.2)$$

Relația (3.2) arată că dacă se variază raportul de transformare (alegînd diferite prize pe înfășurarea primară) se pot obține diferite impedanțe de intrare.

În cazul wattmetrelor de ieșire cu cuadripoli rezistivi de adaptare se pot folosi scheme ca cele prezentate în figura 3.3. Dacă rezistențele care formează cuadripolul se aleg în mod convenabil, rezistența de intrare R_i poate lua diferite valori, în timp ce la ieșirea cuadripolului rezistența rămîne constantă. În acest mod, se poate realiza un wattmetru cu mai multe rezistențe de intrare utilizînd o serie de cuadripoli convenabil calculați. Acest tip de wattmetru, folosind numai rezistoare, poate lucra într-o bandă mai largă de frecvențe decît cel cu transformator.

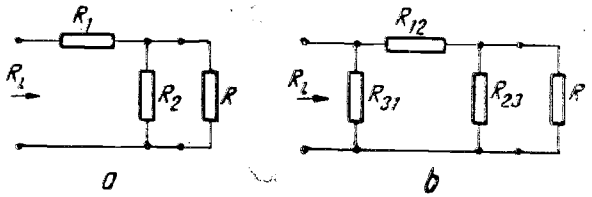


Fig. 3.3. Cuadripoli rezistivi de adaptare:
a — cuadripol în Γ; *b* — cuadripol în Π.

B. WATTMETRE PENTRU FRECVENȚE ÎNALTE. WATTMETRUL CU TERMOCUPLURI

Wattmetrul cu termocupluri este un aparat care măsoară direct puterea electrică și funcționează pînă la frecvențe de rdinul megaherților. Schema acestuia (fig.3.4) conține două termocupluri identice T_1 și T_2 a căror diferență de tensiune termoelectromotoare se măsoară cu un milivoltmetru magnetoelectric.

● Un **termocuplu** este alcătuit din două metale diferite sudate între ele la cîte un capăt; sudura este încălzită de un fir de încălzire de rezistență r parcurs de un curent electric i. La capetele libere ale celor două metale ce formează termocuplul, apare o tensiune termoelectromotoare E dependentă de temperatura sudurii deci de puterea P' care se disipă în firul încălzitor:

$$E = k\ P' = k\ r\ i^2. \qquad (3.3)$$

● În schema unui **wattmetru cu termocupluri**, două termocupluri generează două tensiuni, E_1 și E_2, a căror diferență este măsurată de un milivoltmetru. În serie cu impedanța de sarcină sînt conectate două rezistențe identice R_a de valoare mult mai mică decît Z_s, iar în paralel — o rezistență R_v de valoare mult mai mare decît Z_s. În acest caz se poate considera că prin rezistențele R_a trece un curent egal cu curentul i prin sarcină, iar căderea de tensiune u_v de pe o porțiune a rezistenței R_v este proporțională cu tensiunea u și în fază cu aceasta ($u_v =$

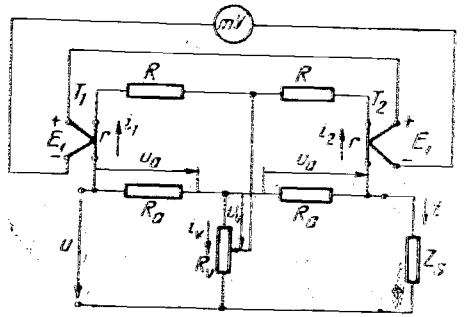


Fig. 3.4. Wattmetrul cu termocupluri.

$= k_v u$). Rezistențele R sînt astfel alese încît curenții i_1 și i_2 prin firele de încălzire să fie mult mai mici decît i. În aceste condiții, notînd cu $u_a = R_a i$, se poate scrie:

$$i_1 = \frac{1}{R+r}(u_a + u_v) \quad \text{și} \quad i_2 = \frac{1}{R-r}(u_a - u_v). \tag{3.4}$$

Tensiunile generate de cele două termocupluri vor fi:

$$E_1 = k\,r\,i_1^2 = k\,r\left[\frac{1}{R+r}(u_a + u_v)\right]^2;$$
$$E_2 = k\,r\,i_2^2 = k\,r\left[\frac{1}{R+r}(u_a - u_v)\right]^2. \tag{3.5}$$

Milivoltmetrul măsoară diferența între cele două tensiuni:

$$E_1 - E_2 = 4\,k\,r\left(\frac{1}{R+r}\right)^2 u_a\,u_v = 4\,k\,r\left(\frac{1}{R+r}\right)^2 R_a i\;k_v u. \tag{3.6}$$

Notînd în relația (3.6) $4\,k\,r\left(\frac{1}{R+r}\right)^2 R_a\,k_v = K$ și înlocuind valorile instantanee ale lui u și i cu expresiile lor ($u = U_{max}\sin\omega t$, și $i = I_{max}\sin(\omega t + \varphi)$), se obține:

$$E_1 - E_2 = KU_{max}I_{max}\sin\omega t\sin(\omega t + \varphi) =$$
$$= KU_{max}I_{max}\frac{1}{2}[\cos\varphi - \cos(2\,\omega t + \varphi)]. \tag{3.7}$$

Milivoltmetrul fiind de tip magnetoelectric, va indica numai componenta continuă E_0. Exprimînd valorile maxime în funcție de valorile eficace ($U_{max} = U\sqrt{2}$ și $I_{max} = I\sqrt{2}$) se observă că indicația milivoltmetrului este proporțională cu puterea P:

$$E_0 = K\frac{1}{2}U_{max}I_{max}\cos\varphi = KUI\cos\varphi = KP. \tag{3.8}$$

Acest lucru permite ca milivoltmetrul să poată fi etalonat direct în wați, obținîndu-se un aparat cu citire directă pentru măsurarea puterii, deci un wattmetru.

C. DETERMINAREA PUTERII PRIN TRANSFORMAREA ENERGIEI ELECTROMAGNETICE ÎN ALTE FORME DE ENERGIE

1. METODA CALORIMETRICĂ

Metoda calorimetrică se bazează pe măsurarea efectului caloric pe care semnalul a cărui putere se măsoară îl dezvoltă într-o sarcină rezistivă. Pe baza acestei metode au fost realizate diferite aparate, dintre care **calorimetrul cu substituție** este reprezentat în figura 3.5. Calorimetrul cu substituție constă dintr-o sarcină rezistivă scufundată într-un lichid a cărui creștere de temperatură se poate măsura. Se alimentează sarcina R în înaltă frecvență și se notează creșterea temperaturii. Apoi se înlocuiește sursa de înaltă frecvență cu o sursă de joasă frecvență sau de curent continuu a cărei putere se reglează pînă cînd se obține aceeași creștere de temperatură. Puterea de joasă frecvență sau de curent continuu se măsoară cu wattmetrul electrodinamic sau cu ampermetrul și voltmetrul. Întrucît cele două surse au produs același efect termic, rezultă că puterea de înaltă frecvență are aceeași valoare cu cea de înaltă frecvență.

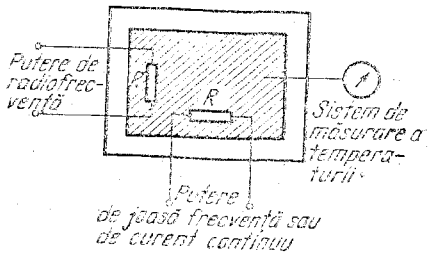


Fig. 3.5. Calorimetrul cu substituție.

Metoda calorimetrică este utilizată în special pentru măsurarea puterilor *în foarte înaltă frecvență*.

2. METODA FOTOMETRICĂ

Metoda fotometrică este tot o metodă de substituție, utilizată în special în domeniul frecvențelor înalte. Instalația pentru măsurarea puterii prin metoda fotometrică este reprezentată în figura 3.6 și conține un bec L care este alimentat succesiv de la o sursă de înaltă frecvență și de la o sursă de curent continuu. Modul de lucru presupune două etape:

— în prima etapă întrerupătorul M este deschis și becul L se alimentează de la sursa de înaltă frecvență a cărei putere se măsoară. Filamentul becului devine incandescent și cu ajutorul unei fotoce-

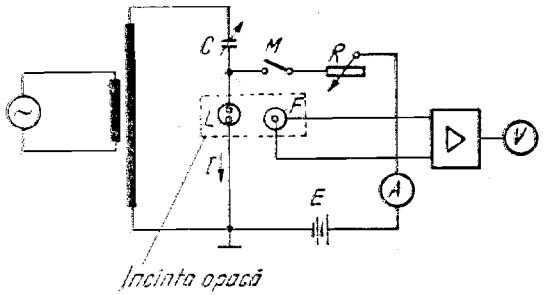


Fig. 3.6. Măsurarea puterii prin metoda fotometrică.

lule F se determină fluxul luminos emis sub un anumit unghi solid. La voltmetrul V se va citi în acest caz tensiunea U_0;

— în cea de-a doua etapă, se întrerupe sursa de înaltă frecvență și se închide întrerupătorul M, astfel încît becul L este alimentat în curent continuu. Se reglează rezistența R pînă cînd voltmetrul V indică din nou tensiunea U_0. Aceasta înseamnă că cele două surse au debitat puteri egale.

Citind indicația ampermetrului A și cunoscînd valoarea rezistenței R_L a becului, se poate calcula puterea de curent continuu $P_{cc} = I^2 R_L$, care este egală cu puterea de înaltă frecvență.

Metoda descrisă, poate introduce erori la frecvențe mari, datorită variației rezistenței becului în funcție de frecvență. Pentru puteri mici și frecvențe pînă la 5 MHz erorile nu depășesc 10%. Pentru frecvențe mai mari, se pot face corecții în funcție de frecvență.

Probleme și întrebări recapitulative

1. De ce la măsurarea puterii în circuitele electronice wattmetrele electrodinamice și ferodimanice nu mai sînt suficiente?
2. Ce metode sînt specifice pentru măsurarea puterii în circuitele electronice?
3. De ce la metoda sarcinii artificiale sarcina reală se înlocuiește cu o rezistență?
4. Cum se pot realiza diferite impedanțe de intrare la wattmetrele de ieșire?
5. Pînă la ce frecvențe se pot utiliza wattmetrele cu termocupluri?
6. Ce metodă se folosește la măsurarea puterii la frecvențe foarte înalte?
7. Ce erori pot interveni la măsurarea puterii prin metoda fotometrică?

CAPITOLUL 4

APARATE ȘI METODE PENTRU MĂSURAREA IMPEDANȚELOR

A. GENERALITĂȚI

● **Impedanța** este o mărime care *caracterizează funcționarea elementelor de circuit în curent alternativ*. Ea se definește cu ajutorul legii lui Ohm aplicate în curent alternativ. În curent continuu, conform legii lui Ohm:

$$\frac{U}{I} = R. \tag{4.1}$$

În curent alternativ, legea lui Ohm devine:

$$\frac{U}{I} = Z. \tag{4.2}$$

Avînd aceeași relație de definiție, rezistența și impedanța vor avea aceeași unitate de măsură, ohmul $\left(1\Omega = \frac{1\text{V}}{1\text{A}}\right)$.

Față de rezistență, impedanța are un caracter mai complex, deoarece în curent alternativ elementele de circuit prezintă, pe lîngă proprietatea de rezistență, și proprietățile de inductanță (L) și capacitate (C).

● **Inductanța** este proprietatea elementelor de circuit de a se opune variațiilor de curent. Inductanța se poate defini ca raportul între fluxul magnetic ce trece printr-un element de circuit și intensitatea curentului care a generat acel flux: $L = \frac{\Phi}{I}$. Unitatea de măsură pentru inductanță este henry $\left(1\text{ H} = \frac{1\text{ Wb}}{1\text{ A}}\right)$. În practică se utilizează frecvent submultiplii mH și μH.

Inductanța este o proprietate specifică bobinelor (*inductanță proprie* — a unei bobine, sau inductanță mutuală — între două bobine, atunci cînd fluxul creat de o bobină trece și prin spirele celeilalte bobine).

● **Capacitatea** este proprietatea elementelor de circuit de a se opune variațiilor de tensiune și se poate defini ca raportul între cantitatea de electricitate ce se acumulează într-un element de circuit și tensiunea la care este alimentat elementul respectiv: $C = \frac{Q}{U}$. Unitatea de măsură pentru capacitate este faradul $\left(1\,\text{F} = \frac{1\,\text{C}}{1\,\text{V}}\right)$. În practică se utilizează submultiplii pF, nF și μF.

● **Reactanță.** Valorile inductanțelor și capacităților depind de datele constructive ale elementelor de circuit (dimensiuni, materiale). În circuit, ele se manifestă prin „reactanțele" corespunzătoare, care depind de frecvență. În curent alternativ sinusoidal reactanța inductivă este $X_L = \omega L$, iar reactanța capacitivă este $X_C = \frac{1}{\omega C}$, unde $\omega = 2\pi f$ reprezintă pulsația.

● **Diagrame fazoriale.** Impedanțele prezintă următoarele componente:

R — rezistență;

X_L — reactanță inductivă;

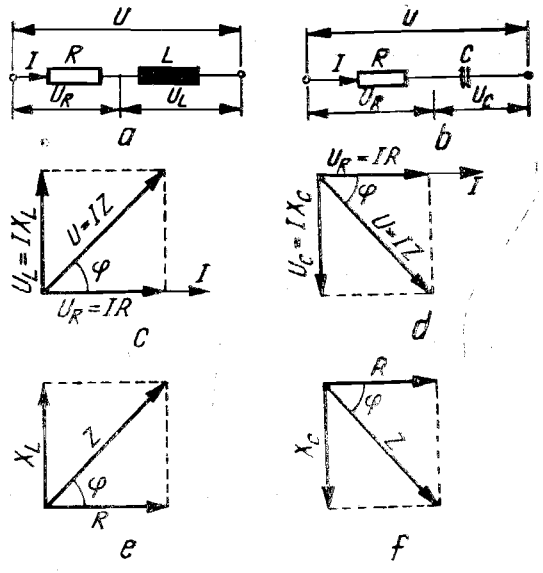
X_C — reactanță capacitivă.

Cele trei componente ale impedanței nu se pot însuma algebric, ci numai fazorial, deoarece inductanțele defazează tensiunea înaintea curentului cu $\frac{\pi}{2}$ rad, capacitățile defazează tensiunea în urma curentului cu $\frac{\pi}{2}$ rad, iar rezistențele nu introduc nici un defazaj.

În figurile 4.1,*c* și 4.1,*d* s-au reprezentat diagramele fazoriale corespunzătoare tensiunilor ce intervin în cazul impedanțelor din figurile 4.1, *a* și 4.1, *b*. Dacă în diagramele fazoriale din figurile 4.1,*c* și 4.1,*d* se simplifică toate tensiunile cu I, se obțin diagramele din figurile 4.1,*e* și 4.1,*f*, reprezentînd diagramele fazoriale ale impedanțelor Z. Din aceste diagrame se pot calcula modulul impedanței Z și tangenta unghiului de defazaj φ dintre tensiune și curent:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}\,;\ \operatorname{tg}\varphi = \frac{X}{R}. \qquad (4.3)$$

Fig. 4.1. Impedanțe și diagramele lor fazoriale.



● **Exprimarea impedanțelor în numere complexe.** Asimilînd diagramele fazoriale din figura 4.1 unui plan complex (axa orizontală — numere reale, axa verticală — numere imaginare), impedanțele se pot exprima sub forma unor numere complexe. Pe diagrame se observă că reactanțele inductive defazează tensiunea înaintea curentului cu $\frac{\pi}{2}$ rad, deci în plan complex X_L devine $jX_L = j\omega L$, iar reactanțele capacitive defazează tensiunea în urma curentului cu $\frac{\pi}{2}$ rad, deci în plan complex X_C devine $-jX_C = -\text{j}\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\text{j}\omega C}$.

Ținînd seama de aceste observații, se poate scrie:

$$Z = R + \text{j}X = R + \text{j}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + \text{j}\omega L + \frac{1}{\text{j}\omega C}. \qquad (4.4)$$

○ **Notă.** În aceste expresii s-a folosit $\text{j} = \sqrt{-1}$ în loc de $\text{i} = \sqrt{-1}$, pentru a nu se crea confuzii cu intensitatea instantanee a curentului electric, care se notează cu i.

● **Factorul de calitate.** Elementele reactive de circuit (bobinele și condensatoarele) prezintă pe lîngă reactanță și o rezistență în care se consumă energie. Cu cît pierderile de energie sînt mai mici, cu atît

calitatea elementelor reactive este mai bună. *Factorul de calitate*, care se notează cu Q, se definește prin raportul între reactanța și rezistența unui element de circuit sau ale unui circuit:

$$Q = \frac{X}{R}. \qquad (4.5)$$

Pentru o bobină care are rezistența R_L, $Q_L = \frac{\omega L}{R_L}$; pentru un condensator cu rezistența de pierderi R_s (considerată în serie), $Q_C = \frac{1}{\omega C R_s}$, iar pentru un circuit în care pe lîngă rezistența bobinei mai intervin și alte rezistențe R', $Q = \frac{\omega L}{R_L + R'}$.

B. METODE PENTRU MĂSURAREA IMPEDANȚELOR

Deoarece, așa cum s-a arătat, rezistența în curent continuu și impedanța în curent alternativ au aceeași relație de definiție, metodele utilizate pentru măsurarea rezistențelor în curent continuu se pot adapta și la măsurarea impedanțelor în curent alternativ, cu următoarele observații:

— circuitele de măsurare vor fi alimentate în curent alternativ de la o sursă de frecvență f;

— aparatele de măsurat folosite trebuie să fie astfel alese încît să funcționeze la frecvența f a sursei de alimentare;

— elementele de circuit, fiind alimentate în curent alternativ, se vor comporta ca impedanțe.

Pornind de la aceste considerente, s-a realizat o gamă variată de aparate pentru măsurarea impedanțelor și a componentelor lor, utilizîndu-se numeroase metode de măsurare. În continuare se vor analiza cîteva dintre acestea.

1. MĂSURAREA IMPEDANȚELOR PRIN METODA SUBSTITUȚIEI

● Metoda substituției este cea mai simplă metodă. Ea folosește **montajul** din figura 4.2, în care:

G este un generator de c.a. de tensiune U și frecvență f;

A — ampermetru de curent alternativ, capabil să funcționeze la frecvența f;

R_e — rezistență variabilă, etalonată (cutie de rezistențe);

K — comutator cu două poziții.

● **Modul de lucru**, același ca și în curent continuu, are două etape:

I — se închide comutatorul K pe poziția *1* și se citește pe ampermetrul A intensitatea I_1 a curentului electric $\left(I_1 = \frac{U}{Z_x}\right)$;

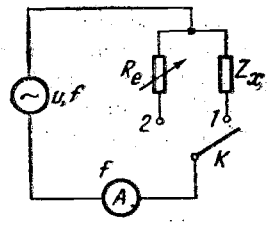


Fig. 4.2. Măsurarea impedanțelor prin metoda substituției.

II — se trece comutatorul K pe poziția *2* și se reglează rezistența variabilă R_e pînă cînd ampermetrul va indica un curent $I_2 = I_1$. În acest caz $I_2 = \frac{U}{R_e}$. Deoarece $I_2 = I_1$, rezultă că $Z_x = R_e$.

După cum se observă, această metodă permite numai măsurarea globală a impedanțelor, nu și a componentelor lor (R, L, C).

2. MĂSURAREA INDUCTANȚELOR PRIN METODA AMPERMETRULUI ȘI VOLTMETRULUI

a. MĂSURAREA INDUCTANȚELOR PROPRII

Măsurarea inductanțelor proprii ale bobinelor folosind metoda ampermetrului și voltmetrului se bazează pe comportarea diferită a bobinelor în curent continuu și în curent alternativ. Întrucît bobinele au de obicei impedanțe mult mai mici decît rezistența voltmetrului, se folosește varianta aval.

● **Montajul** folosit este reprezentat în figura 4.3. Comutatorul K, cu două poziții, permite alimentarea succesivă a circuitului în curent continuu și în curent alternativ.

● **Modul de lucru.** Măsurarea se desfășoară pe:

I — se închide comutatorul K pe poziția *1* și montajul se alimentează în curent continuu. Se măsoară intensitatea curentului I cu ampermetrul, tensiunea U cu voltmetrul și, aplicînd legea lui Ohm, se calculează R_x;

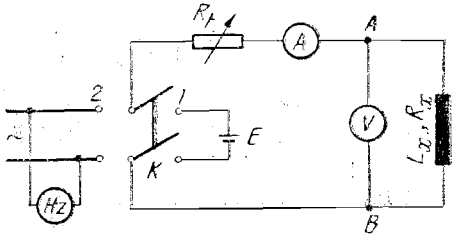


Fig. 4.3. Măsurarea inductanțelor proprii prin metoda ampermetrului și voltmetrului.

II — se trece comutatorul K pe poziția 2 și montajul se alimentează în curent alternativ. Se măsoară din nou intensitatea curentului și tensiunea și de această dată, aplicînd legea lui Ohm, se va calcula Z;

III — cunoscînd valorile R_x și Z și cunoscînd sau măsurînd frecvența, se poate deduce valoarea inductanței:

$$Z = \sqrt{R_x^2 + \omega^2 L_x^2},$$

de unde:

$$L_x = \frac{1}{2\pi f}\sqrt{Z^2 - R_x^2}. \qquad (4.6)$$

b. MĂSURAREA INDUCTANȚELOR MUTUALE

Măsurarea inductanței mutuale prin metoda ampermetrului și voltmetrului se bazează pe măsurarea inductanței totale a două bobine legate în serie, în două variante: o dată astfel încît fluxurile care le străbat să se însumeze, iar altă dată legate astfel încît fluxurile să se scadă (să fie de sens contrar). Cum sensul fluxului depinde de sensul curentului prin bobine, este necesar ca în varianta a doua să se inverseze sensul curentului într-o bobină, inversînd legarea capetelor ei în circuit.

● Măsurarea inductanței totale a celor două bobine se realizează cu același **montaj** și aceeași metodă ca și în cazul inductanțelor proprii numai că între punctele A, B se leagă cele două bobine în serie.

● **Modul de lucru.** Se procedează astfel:

I — cele două bobine se leagă în serie așa încît fluxurile lor să se însumeze (fig. 4.4,*a*). În acest caz inductanța mutuală L_{12} este pozitivă. Se măsoară inductanța totală L_I:

$$L_I = L_1 + L_2 + 2L_{12}; \qquad (4.7)$$

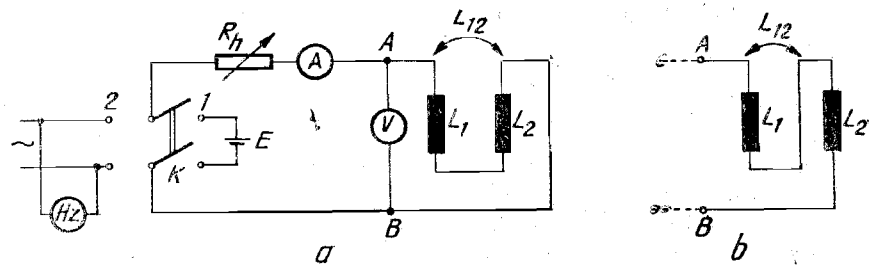


Fig. 4.4. Măsurarea inductanțelor mutuale.

II — cele două bobine se leagă în serie așa încît fluxurile lor să se scadă (fig. 4.4,*b*). În acest caz inductanța mutuală este negativă. Se măsoară inductanța totală L_{II}, care va fi:

$$L_{II} = L_1 + L_2 - 2L_{12}. \qquad (4.8)$$

Făcînd diferența $L_I - L_{II}$, se obține:

$$L_I - L_{II} = 4L_{12},$$

de unde:

$$L_{12} = \frac{L_I - L_{II}}{4}. \qquad (4.9)$$

3. PUNȚI DE CURENT ALTERNATIV

Punțile de curent alternativ, utilizate la măsurarea impedanțelor, au aceeași schemă de principiu și același mod de funcționare ca și punțile de curent continuu. Pentru comparație, în figura 4.5 sînt reprezentate o punte de curent continuu și o punte de curent alternativ.

Puntea de curent alternativ este alimentată de la o sursă de frecvență f, elementele din brațele sale se comportă ca impedanțe, iar instrumentul indicator de nul trebuie să funcționeze la frecvența f a sursei.

● **Condițiile de echilibru.** Ca și la punțile de curent continuu, cînd prin diagonala în care este montat instrumentul indicator curentul este zero, între cele patru brațe ale punții există o relație bine determinată, cunoscută sub numele de *condiția de echilibru*, și care este aceeași ca și la punțile de curent continuu (produsul a două brațe opuse este egal cu produsul celorlalte două brațe opuse, sau raportul a două brațe alăturate este egal cu produsul celorlalte două brațe alăturate).

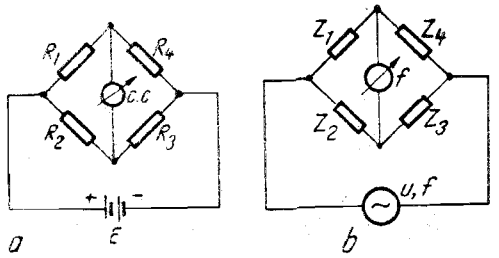


Fig. 4.5. Punți electrice de măsurat:
a — punte de c.c.; *b* — punte de c.a.

În curent alternativ, această condiție devine:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad \text{sau} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_4}{Z_3}. \tag{4.10}$$

Fiecare impedanță poate fi exprimată prin modulul său $|Z|$ și prin defazajul φ pe care îl introduce: $Z = |Z|e^{j\varphi}$. Ca urmare, condiția de echilibru se poate scrie și sub forma:

$$|Z_1|e^{j\varphi_1}|Z_3|e^{j\varphi_3} = |Z_2|e^{j\varphi_2}|Z_4|e^{j\varphi_4},$$

ceea ce este echivalent cu două relații, una referitoare la module și cealaltă la faze:

$$\boxed{|Z_1||Z_3| = |Z_2||Z_4|} \quad \text{și} \quad \boxed{\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4} \tag{4.11}$$

Cea de-a doua relație arată că punțile de curent alternativ nu pot avea orice configurație.

Dacă în două brațe opuse ale unei punți sînt numai rezistențe, în celelalte două brațe opuse trebuie să fie reactanțe de semne contrare (într-un braț inductanță, în brațul opus capacitate).

De exemplu, dacă $Z_1 = R_1$ și $Z_3 = R_3$, atunci $\varphi_1 = \varphi_3 = 0$ și $\varphi_2 + \varphi_4 = 0$. Rezultă că defazalele φ_2 și φ_4 trebuie să fie de semne contrare, deci impedanțele Z_2 și Z_4 să conțină reactanțe diferite.

Din această categorie fac parte punțile Maxwell și Hay.

Dacă în două brațe alăturate ale unei punți sînt numai rezistențe, de exemplu $Z_1 = R_1$ și $Z_2 = R_2$, în celelalte două brațe alăturate trebuie să fie reactanțe de același fel ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ și $\varphi_3 = \varphi_4$, deci φ_3 și φ_4 trebuie să aibă același semn). Din această categorie fac parte punțile Sauty și Nernst.

Ca și la punțile de curent continuu, dacă se cunosc elementele din trei brațe, se pot deduce cele din al patrulea braț. Pentru calcule se utilizează de obicei exprimarea impedanțelor sub forma numerelor complexe. În cazul cel mai general, fiecare impedanță poate fi de forma $Z = R + jX$ și condiția de echilibru devine:

$$(R_1 + jX_1)(R_3 + jX_3) = (R_2 + jX_2)(R_4 + jX_4). \tag{4.12}$$

Desfăcînd parantezele și separînd partea reală de partea imaginară se obțin două relații care exprimă împreună condiția de echilibru:

$$\begin{cases} R_1R_3 - X_1X_3 = R_2R_4 - X_2X_4; \\ R_1X_3 + R_3X_1 = R_2X_4 + R_4X_2. \end{cases} \tag{4.13}$$

● **Echilibrarea punții.** Pentru satisfacerea celor două relații de echilibru, la punțile de curent alternativ *sînt necesare două elemente de reglaj*. Acestea pot fi rezistoare, bobine sau condensatoare variabile. Deoarece bobinele variabile de inductanțe cunoscute se realizează mai greu în practică, pentru echilibrarea punților de curent alternativ se preferă rezistoare și condensatoare variabile.

Există o mare varietate de punți de curent alternativ. Ele poartă de obicei numele savanților care le-au propus. Se vor analiza în continuare cîteva dintre cele mai răspîndite punți.

a. PUNȚI PENTRU MĂSURAREA CAPACITĂȚII

● **Puntea Sauty** (fig. 4.6, *b*) este folosită *pentru măsurarea condensatoarelor de bună calitate, cu pierderi mici*, a căror schemă echivalentă se reprezintă de obicei ca în figura 4.6, *a*. Rezistența R_x figurată în serie cu capacitatea C_x reprezintă rezistența armăturilor condensatorului și a terminalelor și este de valoare mică.

Modul de lucru. Se montează condensatorul de măsurat la bornele special prevăzute în construcția punții și se reglează elementele variabile pînă cînd instrumentul indicator arată zero. În acest moment, condiția de echilibru este satisfăcută și se poate scrie:

$$R_1\left(R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}\right) = R_2\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x}\right). \tag{4.14}$$

Separînd părțile imaginare de cele reale, rezultă:

$$R_1R_3 = R_2R_x \text{ de unde } \boxed{R_x = \frac{R_1}{R_2}R_3} \tag{4.15}$$

$$\frac{R_1}{\omega C_3} = \frac{R_2}{C_x} \text{ de unde: } \boxed{C_x = \frac{R_2}{R_1}C_3} \tag{4.16}$$

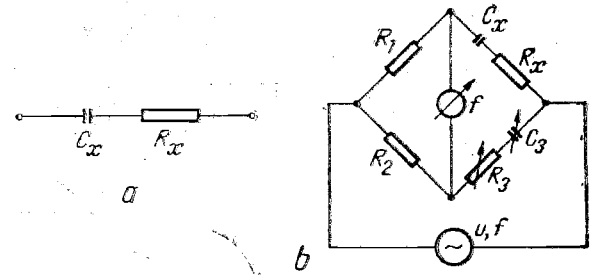


Fig. 4.6. Schema echivalentă a unui condensator cu pierderi mici (*a*); puntea Sauty (*b*).

După cum se observă, R_x este proporțional cu R_3, iar C_x — cu C_3. Această proporționalitate permite să se gradeze R_3 în valori ale lui R_x, și C_3 în valori ale lui C_x. Raportul $\frac{R_1}{R_2}$ devine factor de multiplicare.

● **Puntea Nernst** (fig. 4.7, *b*) se folosește *pentru măsurarea condensatoarelor cu pierderi mari*, a căror schemă echivalentă se reprezintă de obicei ca în figura 4.7, *a*. Rezistența R_x figurată în paralel cu capacitatea C_x este în acest caz de valoare mare și reprezintă rezistența în curent alternativ a dielectricului dintre armăturile condensatorului. Brațul în care se află elementele de reglaj are o schemă asemănătoare cu schema echivalentă a condensatorului de măsurat.

Modul de lucru. Se montează condensatorul de măsurat la bornele prevăzute în acest scop și se reglează pe rînd elementele variabile pînă se aduce puntea la echilibru, cînd se poate scrie:

$$R_1 \frac{1}{\frac{1}{R_3} + j\omega C_3} = R_2 \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x}. \qquad (4.17)$$

Aducînd la același numitor și separînd părțile reale de cele imaginare, se obține:

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3} \text{ de unde } \boxed{R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3} \qquad (4.18)$$

și

$$R_1 \omega C_x = R_2 \omega C_3 \text{ de unde: } \boxed{C_x = \frac{R_2}{R_1} C_3} \qquad (4.19)$$

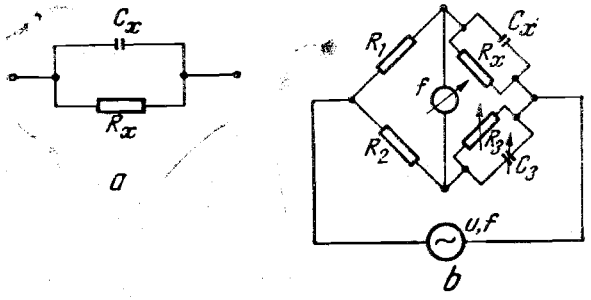


Fig. 4.7. Schema echivalentă a unui condensator cu pierderi mari (*a*), puntea Nernst (*b*).

Ca și la puntea Sauty, și la puntea Nernst se pot grada R_3 în valori ale lui R_x, și C_3 în valori ale lui C_x. Raportul $\frac{R_1}{R_2}$ devine factor de multiplicare.

● **Puntea Schering** este una dintre cele mai răspîndite punți. Este folosită atît la tensiuni joase, cît și la tensiuni înalte. De asemenea, se folosește atît în joasă frecvență, cît și la frecvențe înalte.

Puntea Schering reprezentată în figura 4.8 se utilizează *pentru măsurarea condensatoarelor sub înaltă tensiune*. Montajul este astfel realizat încît aproape toată tensiunea să se regăsească la bornele condensatoarelor C_x și C_1; pe elementele de reglaj nu se aplică decît o mică parte din tensiunea de alimentare a punții, astfel încît să fie respectate normele de tehnica securității muncii. Pentru a înlătura pericolul apariției unor tensiuni mari pe elementele reglabile ale punții, punctele A și B se conectează la masă prin siguranțele de protecție S. În cazul ridicării tensiunii peste o anumită valoare, siguranțele S se străpung și brațele reglabile ale punții sînt legate la pămînt.

Modul de lucru este același ca la celelalte punți. Din condiția de echilibru:

$$R_3 \frac{1}{j\omega C_1} = \left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x}\right) \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2} \qquad (4.20)$$

se poate deduce:

$$\boxed{R_x = \frac{C_2}{C_1} R_3} \text{ și } \boxed{C_x = \frac{R_2}{R_3} C_1} \qquad (4.21)$$

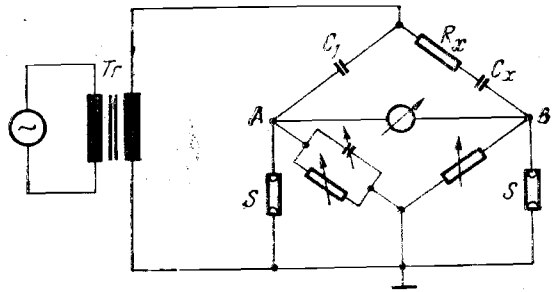


Fig. 4.8. Puntea Schering pentru măsurarea condensatoarelor sub înaltă tensiune.

b. PUNȚI PENTRU MĂSURAREA INDUCTANȚEI

● **Puntea Maxwell** (fig. 4.9) este cea mai utilizată punte pentru măsurarea bobinelor. În construcția sa, în două brațe opuse se folosesc rezistoare, iar în brațul opus bobinei ce se măsoară se află un condensator în paralel cu un rezistor.

Modul de lucru. Se aduce puntea în echilibru prin reglarea pe rînd a elementelor variabile. La echilibru se poate scrie:

$$R_1R_3 = (R_x + j\omega L_x)\left(\frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2}\right). \qquad (4.22)$$

Din relația (4.22) se poate deduce:

$$\boxed{R_x = \frac{R_1R_3}{R_2}} \text{ și } \boxed{L_x = R_1R_3C_2} \qquad (4.23)$$

Puntea Maxwell *este destinată măsurării bobinelor cu factor de calitate* $\left(Q = \frac{\omega L_x}{R_x}\right)$ *mic*. La bobinele cu Q mare, R_x este foarte mic și după cum rezultă din relația (4.23) ar fi necesar ca R_2 să fie de valoare foarte mare. Acest lucru este mai dificil de realizat în practică.

● **Puntea Hay** (fig. 4.10) se folosește *pentru măsurarea bobinelor cu factor de calitate mare*. Spre deosebire de puntea Maxwell, în construcția punții Hay elementele de reglaj din brațul opus bobinei sînt montate în serie.

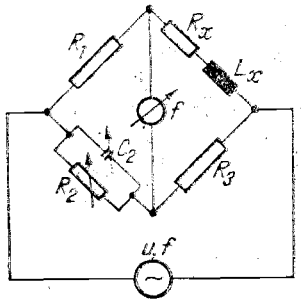


Fig. 4.9. Puntea Maxwell.

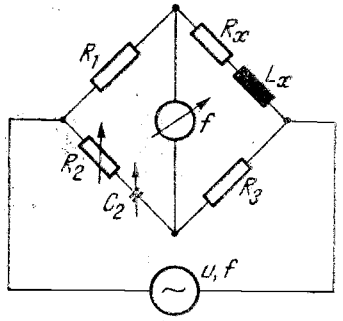


Fig. 4.10. Puntea Hay.

Modul de lucru. Reglînd elementele variabile pe rînd, se aduce puntea la echilibru, cînd este satisfăcută relația:

$$R_1R_3 = (R_x + j\omega L_x)\left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right). \qquad (4.24)$$

Separînd părțile reale de cele imaginare, se obține:

$$R_1R_3 = R_2R_x + \frac{L_x}{C_2} \quad \text{și} \quad \frac{R_x}{\omega C_2} = R_2\omega L_x. \qquad (4.25)$$

Dacă în ultima relație se împart ambii termeni cu R_x și R_2, se observă că $\frac{1}{\omega R_2C_2} = \frac{\omega L_x}{R_x} = Q$. Rezolvînd sistemul format din relațiile (4.25) și ținînd seama că $Q \gg 1$, rezultă:

$$\boxed{R_x = R_1R_2R_3\omega^2C_2^2} \text{ și } \boxed{L_x = R_1R_3C_2} \qquad (4.26)$$

După cum se observă din expresia lui R_x, echilibrul acestei punți depinde de frecvență; ca urmare, tensiunea cu care se alimentează puntea trebuie să fie sinusoidală, de frecvență constantă și cunoscută.

c. PUNȚI RLC ȘI PUNȚI RC

În practică se întîlnesc frecvent punți care permit măsurarea rezistențelor, inductanțelor și capacităților, cunoscute sub numele de *punți universale* sau *punți RLC*. Unele variante constructive permit numai măsurarea rezistențelor și capacităților, fiind deci punți *RC*.

Aceste aparate au în componența lor diferite elemente, care prin intermediul comutatoarelor se pot distribui astfel încît să formeze o punte de tip Wheatstone în cazul măsurării rezistențelor, de tip Sauty în cazul măsurării condensatoarelor și de tip Maxwell cînd se măsoară bobine.

d. PUNȚI ELECTRONICE]

În construcția punților moderne, intervin blocuri funcționale realizate cu componente electrice. Astfel, instrumentul indicator de nul este un voltmetru electronic, pentru alimentarea în curent continuu punțile sînt prevăzute cu un redresor, iar pentru măsurarea în curent alternativ, la o frecvență diferită de 50 Hz, punțile sînt prevăzute cu generatoare care lucrează pe o anumită frecvență (de obicei 1 000 Hz în joasă frecvență și 1 MHz în înaltă frecvență).

În țara noastră se produc punți RLC la I.E.M.I. în București. De exemplu, puntea RLC tip E 0704 are următoarele posibilități de măsurare:

— măsurări de rezistențe de la 0,5 Ω la 105 MΩ;
— măsurări de capacități de la 1 pF la 1 050 μF;
— măsurări de inductanțe de la 50 μH la 105 H;
— măsurări procentuale între —20% și +20%.

Puntea tip E 0704 poate funcționa în curent continuu și în curent alternativ cu frecvența de 50 Hz sau 1 000 Hz.

4. MĂSURĂRI CU Q-METRUL

Q-metrul este un aparat industrial destinat să măsoare factorul de calitate Q. El este un aparat foarte mult folosit deoarece permite și alte măsurări, cum ar fi: măsurarea inductanțelor, măsurarea rezistențelor în înaltă frecvență, măsurarea capacităților etc.

Funcționarea Q-metrului se bazează pe proprietatea circuitelor LC serie de a prezenta la rezonanță, la bornele elementelor lor, o tensiune de Q ori mai mare decît tensiunea cu care au fost alimentate în serie.

● **Schema de principiu** a unui Q-metru este reprezentată în figura 4.11. Condensatorul variabil C împreună cu bobina ce se montează la bornele A, B formează un circuit LC care este alimentat în serie de la un generator G de frecvență variabilă prin intermediul unui circuit de cuplaj care trebuie să prezinte o rezistență neglijabilă. Voltmetrul electronic VE_1 măsoară tensiunea cu care este alimentat circuitul LC, iar voltmetrul electronic VE_2 măsoară tensiunea la bornele condensatorului C.

● **Modul de lucru.** Dacă circuitului LC i se aplică în serie o tensiune U_1, intensitatea curentului prin acest circuit va fi:

$$I = \frac{U_1}{R_L + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}. \qquad (4.27)$$

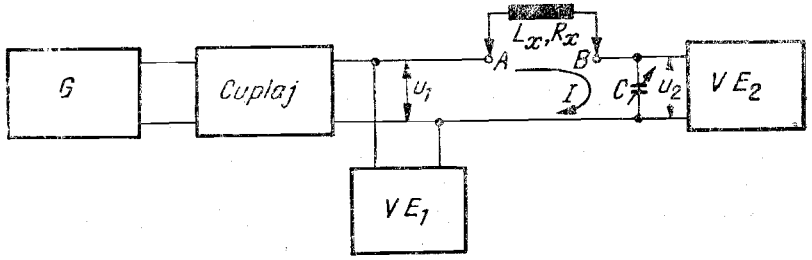


Fig. 4.11. Q-metrul.

Variind capacitatea condensatorului C sau frecvența generatorului se aduce circuitul LC la rezonanță. În acest caz, $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ și intensitatea curentului devine maximă:

$$I = I_{max} = \frac{U_1}{R_L}. \qquad (4.28)$$

Rezonanța este pusă în evidență de voltmetrul VE_2 care măsoară la rezonanță la bornele condensatorului tot o tensiune maximă:

$$U_{2max} = I_{max} X_C = \frac{U_1}{R_L} \cdot \frac{1}{\omega_0 C}. \qquad (4.29)$$

Înlocuind $\frac{1}{\omega_0 C}$ cu $\omega_0 L$ se obține:

$$U_{2max} = U_1 \frac{\omega_0 L}{R_L} = U_1 Q. \qquad (4.30)$$

Conform relației (4.30), tensiunea la bornele condensatorului C, la rezonanță, este de Q ori mai mare decît tensiunea U_1 cu care s-a alimentat circuitul.

Dacă se menține U_1 constant, $U_2 = KQ$. Această relație permite transcrierea scării gradate a voltmetrului VE_2 în valori ale lui Q, obținîndu-se astfel un aparat cu citire directă pentru măsurarea factorului de calitate. Punîndu-se condiția $U_1 = K$, rezultă că scara gradată în valori ale lui Q este valabilă numai pentru o anumită valoare a tensiunii U_1. Pentru a se respecta această condiție, pe scara gradată a voltmetrului VE_1 este trasat un reper, iar tensiunea U_1 se reglează astfel încît indicația voltmetrului VE_1 să fie totdeauna la reperul respectiv.

Probleme și întrebări recapitulative

1. Adaptați metoda comparării tensiunilor studiate în c.c. pentru măsurarea rezistențelor la măsurarea impedanțelor!
2. De ce la punțile de c.a. sînt necesare cel puțin două elemente de reglaj?
3. Comparați punțile Sauty și Nernst!
4. Comparați punțile Maxwell și Owen!
5. Ce este o punte *RLC* electronică?
6. Cum se va modifica scara gradată a unui Q-metru, dacă tensiunea măsurată de voltmetrul VE_1 este jumătate din cea corespunzătoare reperului de pe scara gradată?

CAPITOLUL 5

MĂSURAREA FRECVENȚELOR

Frecvența caracterizează mărimile periodice și reprezintă numărul de perioade în unitatea de timp. Unitatea de măsură pentru frecvențe în sistemul SI este hertul, avînd ca simbol Hz.

În practică se întîlnesc frecvențe de la fracțiuni de herț pînă la zeci de gigaherți. Un domeniu atît de larg de frecvențe a generat și o mare varietate de metode și aparate de măsurat. Metodele cele mai folosite sînt:

— *metode de comparație*: — cu osciloscopul catodic;
— cu heterodinare;
— *metode de rezonanță*;
— *metode directe*;
— *metode numerice*.

Metodele care folosesc osciloscopul catodic vor fi studiate la capitolul destinat osciloscopului, iar metodele numerice — la capitolul care tratează aparatele de măsurat numerice.

A. METODE DE COMPARAȚIE

La metodele de comparație, frecvența de măsurat se compară cu frecvența unui generator de frecvență variabilă și cunoscută.

Dintre metodele de comparație face parte și metoda heterodinării, folosită atît în joasă cît și în înaltă frecvență.

METODA HETERODINĂRII

Măsurarea frecvențelor cu metoda heterodinării se bazează pe principiul heterodinării, conform căruia dacă la intrarea unui element de circuit neliniar se aplică simultan două semnale de frecvențe diferite f_1 și f_2, la ieșirea lui, pe lîngă semnalele aplicate la intrare, datorită

neliniarității, apar și semnale care au frecvențe egale cu suma frecvențelor de la intrare $(f_1 + f_2)$ sau cu diferența lor $(f_1 - f_2)$. Semnalul avînd frecvența egală cu $f_1 - f_2$ se poate separa cu un filtru trece-jos și măsura.

● **Montajul** folosit la măsurarea frecvențelor prin metoda heterodinării este reprezentat în figura 5.1, în care G_x este generatorul

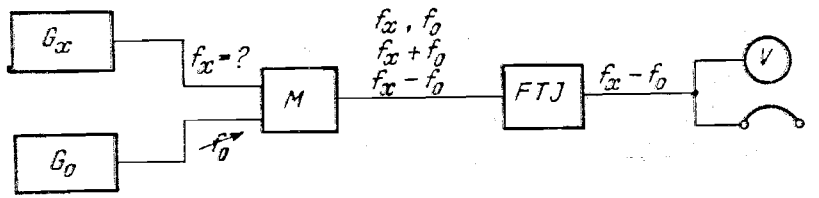


Fig. 5.1. Măsurarea frecvențelor cu metoda heterodinării.

frecvenței f_x ce urmează să se măsoare, iar G_0 este un generator de frecvență f_0 variabilă și cunoscută. Semnalele date de cele două generatoare se aplică elementului neliniar M. La ieșirea acestuia apar și semnale avînd frecvențe $f_x + f_0$ și $f_x - f_0$. Semnalul cu frecvența $f_x - f_0$ se selectează cu filtrul trece-jos (FTJ) și se urmărește într-o cască telefonică conectată în paralel cu un voltmetru de c.a.

● **Modul de lucru.** Se realizează montajul din figura 5.1 și se variază frecvența f_0 a generatorului G_0, urmărind ca în cască să se audă tonuri din ce în ce mai joase. Cînd în cască nu se mai aude nimic, se continuă variația frecvenței f_0 în același sens, pînă cînd voltmetrul V indică zero. În acest caz nu mai există componente de curent alternativ, deci $f_x - f_0 = 0$. Din această egalitate se obține:

$$f_x = f_0, \tag{5.1}$$

ceea ce înseamnă că în momentul în care voltmetrul indică zero, frecvența de măsurat este egală cu frecvența generatorului G_0.

B. METODE DE REZONANȚĂ

Metodele de rezonanță se bazează pe proprietățile selective ale circuitelor LC. După cum se știe, circuitele LC prezintă fenomenul de rezonanță pentru o frecvență dependentă de valorile inductanței L și capacității C $\left(f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\right)$.

Pentru frecvența de rezonanță la circuitul LC serie intensitatea curentului este maximă, iar la circuitul LC derivație tensiunea este maximă. Curbele de rezonanță, reprezentînd variația intensității curentului în funcție de frecvență $I = F(f)$ la circuitul LCs erie, respectiv variația tensiunii în funcție de frecvență la circuitul LC derivație, sînt arătate în figura 5.2.

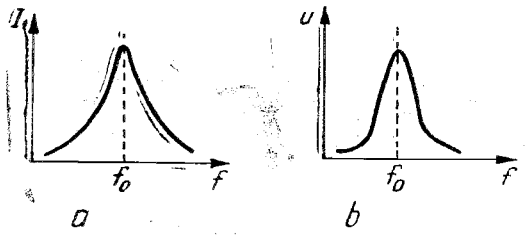


Fig. 5.2. Curbele de rezonanță ale circuitelor LC:
a — circuitul LC serie; *b* — circuitul LC derivație.

FRECVENȚMETRUL DE REZONANȚĂ

● **Montajul.** Frecvențmetrul de rezonanță se folosește *la măsurarea frecvențelor înalte* (radiofrecvențe). El este format dintr-un circuit LC alcătuit dintr-o bobină fixă L și un condensator variabil C și un aparat cu care se poate pune în evidență fenomenul de rezonanță. În acest scop se poate folosi în serie cu circuitul un ampermetru cu termocuplu (fig. 5.3, *a*), sau în paralel pe circuit — un voltmetru electronic (fig. 5.3, *b*).

● **Modul de lucru.** Pentru măsurarea frecvenței f_x a unui semnal, se apropie frecvențmetrul la cîțiva centimetri de sursa de semnal realizîndu-se în acest mod un cuplaj inductiv. Se variază condensatorul C pînă cînd ampermetrul A sau voltmetrul V indică un maxim. În acest moment, frecvențmetrul este la rezonanță pe frecvența sursei:

$$f_x = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (5.2)$$

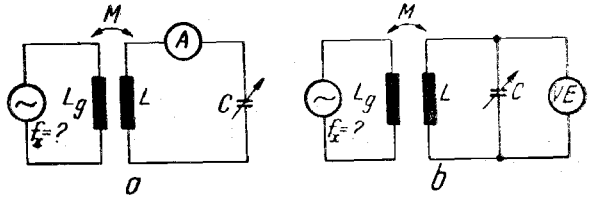


Fig. 5.3. Măsurarea frecvenței cu frecvențmetre de rezonanță:
a — cu ampermetru cu termocuplu; *b* — cu voltmetru electronic.

Deoarece inductanța L are o valoare constantă, se poate scrie:

$$f = K\frac{1}{\sqrt{C}}. \qquad (5.3)$$

Pe baza acestei relații, se poate transcrie scara gradată a condensatorului C în valori ale frecvenței, obținîndu-se un aparat cu citire directă.

Frecvențmetrele de rezonanță se pot etalona și în lungimi de undă corespunzătoare frecvențelor ce se măsoară, pe baza relației:

$$\lambda = c \cdot T, \qquad (5.4)$$

unde λ este lungimea de undă, c — viteza de propagare a undelor electromagnetice, egală cu viteza luminii (3.10^{10} cm/s), iar T — perioada semnalului ce se măsoară. Deoarece $T = \frac{1}{f}$,

$$\lambda = \frac{c}{f}. \qquad (5.5)$$

Această relație permite transcrierea scărilor gradate ale frecvențmetrelor în lungimi de undă, obținîndu-se aparate ce poartă numele de *undametre*. Undametrele sînt foarte mult utilizate în radiocomunicații.

C. METODE DIRECTE

Frecvențmetrele cu citire directă sînt aparate indicatoare cu scara gradată în herți și care nu necesită reglaje sau operații suplimentare în timpul măsurării.

1. FRECVENȚMETRUL CU LAME VIBRANTE

Frecvențmetrele cu lame vibrante se folosesc *pentru frecvențe joase, de obicei pentru frecvența rețelei.*

Aparatul, reprezentat schematic în figura 5.4 conține mai multe lame metalice avînd frecvențe de rezonanță mecanică diferite. În apropierea lamelor, se află o bobină parcursă de curentul a cărui frecvență se măsoară. Sub influența bobinei, lama care are frecvența de rezonanță egală cu frecvența curentului începe să vibreze, indicînd în acest mod frecvența.

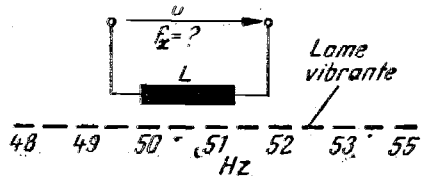


Fig. 5.4. Reprezentarea schematică a unui frecvențmetru cu lame vibrante.

2. FRECVENȚMETRE CU LOGOMETRU

Frecvențmetrele cu logometru funcționează de asemenea *la frecvențe joase* (pînă la cîteva mii de herți). Ele folosesc ca instrumente indicatoare logometre feromagnetice, electrodinamice sau ferodinamice.

Un *logometru* este un aparat cu două circuite de măsurare, parcurse de doi curenți, I_1 și I_2, și a cărui indicație este funcție de raportul celor doi curenți:

$$\alpha = k \frac{I_2}{I_1}, \qquad (5.6)$$

În figura 5.5, *a* este prezentată *schema unui frecvențmetru cu logometru feromagnetic*. În serie cu fiecare bobină a logometrului este conectat cîte un circuit *LC*, acordate pe frecvențele f_{01} și respectiv f_{02}. Variația curenților I_1 și I_2 în funcție de frecvență este reprezentată în figura 5.5, *b*. Indicația aparatului fiind proporțională cu raportul celor doi curenți, va fi la rîndul său funcție de frecvență, iar scara se poate grada direct în frecvențe.

Frecvențmetrele cu logometru se construiesc pentru intervale reduse de frecvențe, cuprinse între cele două frecvențe de rezonanță (de exemplu 45—55 Hz; 410—550 Hz; 1 450—1 550 Hz).

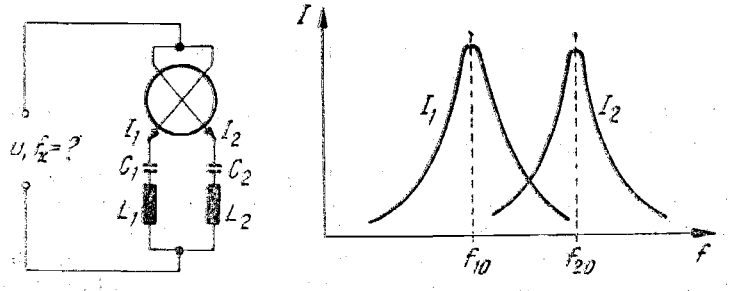


Fig. 5.5. Frecvențmetrul cu logometru.

3. FRECVENȚMETRE CU CONDENSATOR

Frecvențmetrele cu condensator funcționează într-o *bandă largă de frecvențe*, începînd *de la fracțiuni de herț pînă la circa 100 kHz*. Funcționarea lor se bazează pe proporționalitatea între intensitatea curentului într-un circuit care are ca sarcină un condensator și frecvență. Schema principială a unui frecvențmetru cu condensator este reprezentată în figura 5.6. Aplicînd legea lui Ohm, se obține:

$$I = \frac{U}{X_C} = U \cdot C \cdot 2\pi f_x. \qquad (5.7)$$

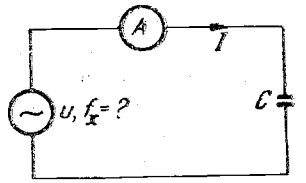


Fig. 5.6. Schema principială a unui frecvențmetru cu condensator.

Dacă circuitul se alimentează de la tensiune constantă, se poate nota $UC2\pi = K$ și se obține:

$$I = Kf. \qquad (5.8)$$

Această relație între intensitatea curentului și frecvență permite transcrierea scării gradate a ampermetrului în valori ale frecvenței, obținîndu-se un frecvențmetru cu citire directă.

La realizarea practică a frecvențmetrelor cu condensator apar *două probleme*:

— tensiunea ce alimentează circuitul cu condensator trebuie să fie constantă;

— ampermetrul trebuie să funcționeze într-o bandă largă de frecvențe.

Pentru menținerea tensiunii constante în circuitul cu condensator, indiferent de amplitudinea tensiunii aplicate la intrarea aparatului, frecvențmetrele sînt prevăzute cu un limitator. Limitatorul este un circuit care menține tensiunea la ieșirea sa constantă dacă tensiunea de la intrare depășește o anumită valoare, numită prag de limitare.

Pentru obținerea unui ampermetru care să funcționeze într-o bandă largă de frecvențe, se folosește un aparat magnetoelectric împreună cu un detector.

Schema bloc a unui frecvențmetru cu condensator este reprezentată în figura 5.7. Comutatorul *K* permite schimbarea condensatorului, pentru a obține mai multe limite de măsurare (xl; xlo; xloo ...).

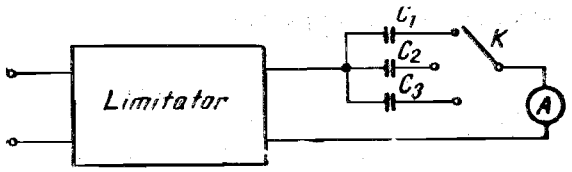


Fig. 5.7. Schema bloc a unui frecvențmetru cu condensator.

Probleme și întrebări recapitulative

1. Ce metode se folosesc pentru măsurarea frecvențelor joase? Dar pentru măsurarea frecvențelor înalte?
2. Ce s-ar întîmpla dacă folosind metoda heterodinării pentru controlul la ieșire ar fi prevăzută numai casca telefonică? Dar dacă ar fi numai voltmetrul?
3. În figura 5.3 se observă că frecvențmetrul de rezonanță nu are borne de legătură cu circuitul de măsurat. Cum se realizează în acest caz cuplajul?

CAPITOLUL 6

OSCILOSCOPUL

A. GENERALITĂȚI

Osciloscopul *este un aparat care permite vizualizarea pe ecranul unui tub catodic a curbelor ce reprezintă variația în timp a diferitelor mărimi au a curbelor ce reprezintă dependența între două mărimi. Imaginile obținute pe ecran se numesc* **oscilograme.**

1. UTILIZĂRI

Osciloscopul este unul dintre cele mai răspîndite aparate electronice, și are o largă utilizare, fie ca aparat de-sine-stătător, fie ca parte componentă a altor aparate electronice.

Ca aparat de-sine-stătător, el se utilizează la:

— vizualizarea și studierea curbelor de variație în timp a diferitelor semnale electrice (curenți, tensiuni);

— compararea diferitelor semnale electrice;

— măsurarea unor mărimi electrice (tensiuni, intensități ale curentului, frecvențe, defazaje, grad de modulație, distorsiuni etc.);

— măsurarea valorilor instantanee a unor semnale (tensiuni, curenți);

— măsurarea intervalelor de timp;

— vizualizarea caracteristicilor componentelor electronice (tuburi electronice, tranzistoare), a curbelor de histerezis ale materialelor magnetice etc.

Uneori *osciloscopul face parte din sisteme de măsurare și control sau din aparate mai complexe*, cum ar fi: caracteriograful (aparat pentru vizualizarea caracteristicilor tranzistoarelor), vobuloscopul (aparat pentru vizualizarea caracteristicilor de frecvență ale amplificatoarelor), selectograful (aparat pentru vizualizarea curbelor de selectivitate) etc.

Împreună cu diferite traductoare, osciloscopul poate fi folosit și la studierea și măsurarea unor mărimi neelectrice, cum ar fi în medicină, fizică nucleară, geofizică etc.

Osciloscopul se realizează într-o mare varietate de tipuri constructive. În țara noastră se construiesc diferite tipuri de osciloscoape la I.E.M.I. — București.

2. PROPRIETĂȚI

Ca aparat de măsurat și control, osciloscopul prezintă unele avantaje ca:

— impedanță de intrare mare, de ordinul megohmilor;

— consum de putere foarte mic de la circuitul de măsurat;

— sensibilitate mare (la unele tipuri constructive constanta fiind de fracțiuni de mV/cm);

— bandă de frecvențe foarte largă, pînă la sute de megaherți și, în construcții speciale (cu eșantionare), pînă la zeci de gigaherți;

— comoditate în exploatare.

3. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Elementul principal al unui osciloscop este tubul catodic. *Pentru a putea afișa pe ecranul tubului catodic curba ce reprezintă dependența între două mărimi*, $A = f(B)$, este necesar:

— să se obțină pe ecran un punct luminos (spot);

— să se poată deplasa acest punct după două direcții, orizontală (x) și verticală (y), pentru a descrie pe ecran curba dorită.

ceea ce este posibil avînd în vedere:

— proprietatea unui fascicul de electroni de a produce în punctul de impact (de ciocnire) iluminarea unui ecran tratat cu substanțe luminofore;

— proprietatea unui fascicul de electroni de a fi deviat sub acțiunea unui cîmp electric sau magnetic.

Fasciculul de electroni este produs, focalizat și accelerat în tubul catodic și lovește ecranul acestuia producînd un punct luminos (spot). Deplasarea spotului pe ecran se realizează prin devierea fasciculului de electroni cu ajutorul unor cîmpuri electrice create de două perechi de plăci de deflexie din interiorul tubului catodic, la aplicarea unor tensiuni U_x la plăcile de deflexie pe direcția y și U_x la plăcile de deflexie pe direcția x.

Pentru ca pe ecran să apară curba $A = f(B)$, celor două perechi de plăci de deflexie li se aplică mărimile A și B. Ca urmare, spotul se va deplasa după direcțiile y și x în același ritm ca și mărimile A și B.

Dacă mărimile A și B sînt periodice, pentru ca pe ecran să apară o imagine stabilă este necesar ca între frecvențele celor două mărimi să existe relația:

$$f_A = n \cdot f_B, \tag{6.1}$$

unde n este un număr întreg.

B. CONSTRUCȚIE ȘI FUNCȚIONARE

1. ELEMENTE COMPONENTE. SCHEMA BLOC

Osciloscoapele moderne sînt alcătuite din mai multe elemente componente, conectate între ele după o schemă bloc ca cea reprezentată în figura 6.1, care conține: tubul catodic, amplificatoarele A_y și A_x, atenuatoarele At_y și At_x, generatorul bazei de timp, circuitul de sincronizare (de declanșare), circuitul pentru controlul intensității spotului, circuitul de întîrziere și blocul de alimentare.

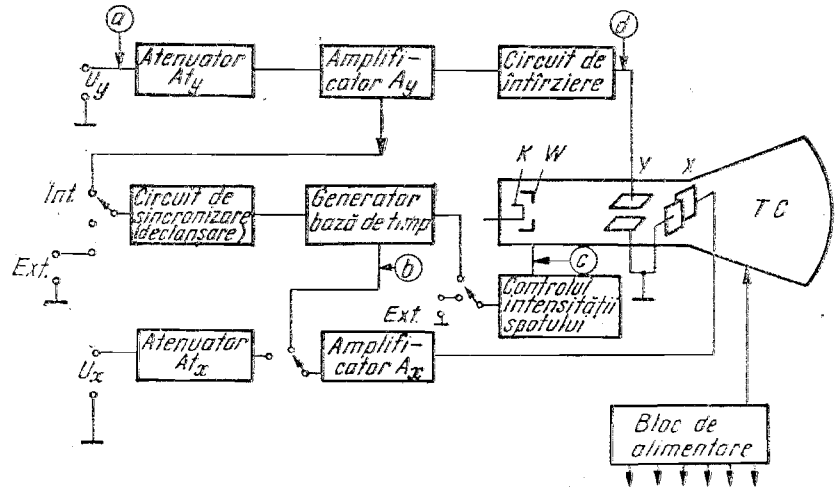


Fig. 6.1. Schema bloc a unui osciloscop catodic.

○ **Notă.** În afara blocurilor componente reprezentate în figura 6.1, care sînt comune tuturor osciloscoapelor moderne, la unele osciloscoape se mai întîlnesc și alte circuite, cu destinații diferite în funcție de tipul și complexitatea aparatului.

● **Tubul catodic** este elementul principal al osciloscopului. În interiorul lui se generează fasciculul de electroni care — deviat sub acțiunea cîmpurilor produse de semnalele de studiat, ciocnesc ecranul, descriind pe acesta curbele dorite.

● **Amplificatoarele** A_y **și** A_x amplifică semnalele de studiat prea mici, înainte de a fi aplicate plăcilor de deflexie.

● **Atenuatoarele** At_y **și** At_x micșorează semnalele prea mari înainte de a fi aplicate amplificatoarelor A_y și A_x. La osciloscoapele moderne, atenuatoarele sînt calibrate în V/cm sau mV/cm reprezentînd tensiunea necesară la intrarea atenuatorului pentru a produce o deplasare a spotului pe ecran de 1 cm. Această calibrare este valabilă numai dacă reglajul amplificării amplificatorului respectiv este la maxim.

● **Generatorul bazei de timp.** În cazul vizualizării curbelor ce reprezintă variația în timp a unor mărimi [$A = f(t)$], la plăcile de deflexie X trebuie să se aplice o tensiune proporțională cu timpul:

$$U_x = K_x t. \tag{6.2}$$

Tensiunea U_x trebuie deci să fie o tensiune liniar-variabilă în timp, adică de forma dinților de ferăstrău. Această tensiune este generată în osciloscop de generatorul bazei de timp.

● **Circuitul de sincronizare (de declanșare).** Pentru ca imaginea de pe ecran să fie stabilă, conform relației (6.1) este necesar ca frecvența semnalului de vizualizat să fie un multiplu întreg al frecvenței bazei de timp:

$$f_A = n \cdot f_{BT}. \tag{6.3}$$

Pentru realizarea acestei condiții, generatorul bazei de timp are frecvența variabilă și, în plus, există posibilitatea sincronizării ei prin circuitul de sincronizare, fie cu semnal de vizualizat, fie cu un alt semnal exterior.

Pentru a se putea vizualiza și semnale neperiodice, la osciloscoapele moderne generatorul bazei de timp poate funcționa, la alegere, fie continuu (*relaxat*), generînd un semnal periodic chiar și în absența semnalului de vizualizat, fie *declanșat*.

Spre deosebire de funcționarea periodică, funcționarea declanșată este comandată chiar de semnalul de vizualizat. În lipsa semnalului, baza de timp nu funcționează. La apariția unui semnal la intrare, baza de timp se declanșează, generează un singur dinte de ferăstrău și apoi

se blochează din nou în așteptarea unui alt semnal. În cazul în care la intrare se aplică un semnal periodic, baza de timp urmărind semnalul de la intrare devine periodică.

○ **Notă.** Deoarece toate osciloscoapele construite în prezent sînt prevăzute cu posibilitatea funcționării generatorului bază de timp și în regim declanșat, denumirea de *sincroscop* folosită pentru osciloscoapele cu bază de timp declanșată nu mai este practic utilizată.

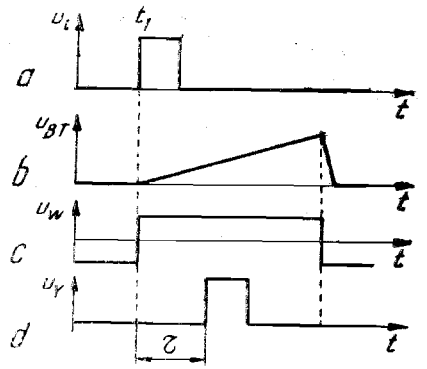


Fig. 6.2. Diagramele tensiunilor în diferite puncte ale schemei osciloscopului: *a* — tensiunea la intrare; *b* — tensiunea generată de baza de timp; *c* — tensiunea pe cilindrul Wehnelt; *d* — tensiunea după circuitul de întîrziere.

În figura 6.2 sînt reprezentate diagramele tensiunilor în diferite puncte ale schemei unui osciloscop funcționînd cu bază de timp declanșată. În figura 6.2, *a* este reprezentat semnalul aplicat la intrare în momentul $t = t_1$. Pînă la apariția semnalului, baza de timp este blocată. La $t = t_1$, baza de timp se declanșează, generează un dinte de ferăstrău și apoi se blochează din nou (fig. 6.2, *b*).

● **Circuitul pentru controlul intensității spotului.** În cazul funcționării cu bază de timp declanșată, în lipsa semnalului la intrare, baza de timp fiind blocată, atît plăcilor de deflexie Y cît și plăcilor de deflexie x nu li se aplică nici un semnal. În această situație fasciculul de electroni ar bombarda ecranul într-un singur punct, în centru, ceea ce ar duce la distrugerea luminoforului în punctul respectiv. Pentru a proteja ecranul, osciloscopul este prevăzut cu un circuit pentru controlul intensității spotului. Acesta furnizează o tensiune negativă care se aplică pe cilindrul Wehnelt pentru stingerea spotului cînd baza de timp este blocată (fig. 6.2, *c*).

Circuitul pentru controlul intensității spotului mai este folosit și la stingerea spotului pe durata cursei de întoarcere și uneori la modularea intensității spotului cu un semnal exterior.

● **Circuitul de întîrziere** are rolul de a întîrzia semnalul astfel încît acesta să se aplice plăcilor Y după ce baza de timp a început să funcționeze. În figura 6.2, *d* este reprezentată diagrama tensiunii u_y, întîrziată față de tensiunea de la intrare, u_i, cu timpul τ. Dacă

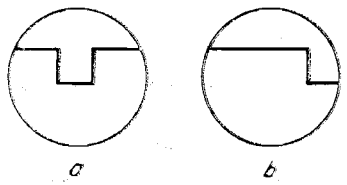


Fig. 6.3. Efectul circuitului de întîrziere:
a — oscilogramă fără circuit de întîrziere; *b* — oscilogramă cu circuit de întîrziere.

nu s-ar folosi circuitul de întîrziere, semnalul s-ar aplica plăcilor *Y* cînd spotul este stins și baza de timp blocată, ceea ce ar face ca începutul semnalului să nu apară pe ecran (fig. 6.3, *a*). Cu circuitul de întîrziere, semnalul se vizualizează corect (fig. 6.3, *b*).

● **Blocul de alimentare** conține surse stabilizate de înaltă și joasă tensiune și asigură alimentarea celorlalte blocuri, inclusiv a tubului catodic.

2. TUBUL CATODIC

Așa cum s-a arătat, tubul catodic reprezentat este elementul principal al osciloscopului. El este un tub cu vid, care are o parte cilindrică și o parte tronconică (fig. 6.4).

● În interiorul tubului **în partea cilindrică**, se află un dispozitiv de emisie și focalizare, numit *tun electronic*, care emite, focalizează și accelerează fasciculul de electroni, și *un sistem de deflexie* pentru devierea acestui fascicul.

● **În partea frontală**, tubul catodic are un *ecran*, acoperit spre interior cu substanțe luminofore. El devine luminos în punctul în care este lovit de fasciculul de electroni.

● În interiorul tubului **pe partea tronconică**, este depus un strat bun conducător de electricitate, care are rolul de ecranare și de colectare a electronilor, după ce aceștia au lovit ecranul.

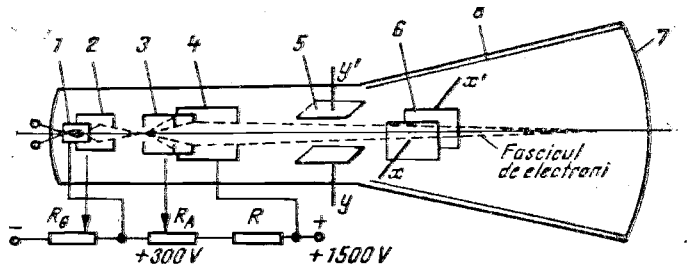


Fig. 6.4. Tubul catodic.

a. DISPOZITIVUL DE EMISIE ȘI FOCALIZARE (TUNUL DE ELECTRONI)

Tunul de electroni este format de obicei dintr-un *catod*, un *electrod de comandă* și *doi anozi*: de focalizare și de accelerare.

● **Catodul** *1* este un cilindru metalic cu suprafața frontală acoperită cu un strat de oxizi de bariu și stronțiu, ce pot emite ușor electronic. Catodul este încălzit indirect de un filament, care se află în interior.

● **Electrodul de comandă** *2*, numit și *cilindru Wehnelt*, este un electrod cilindric ce înconjură catodul și care este prevăzut în partea frontală cu un mic orificiu prin care trec electronii.

Electrodul de comandă se află la un potențial negativ față de catod, frînînd în acest mod deplasarea electronilor. Potențialul electrodului de comandă se poate varia cu potențiometrul R_G. Cu cît electrodul de comandă va fi mai negativ față de catod, cu atît mai puțini electroni vor reuși să treacă de el. În acest mod, reglînd negativarea cilindrului Wehnelt se poate controla numărul electronilor din fascicul ce se îndreaptă spre ecran și, ca urmare, se poate regla luminozitatea spotului de pe ecran.

După trecerea prin electrodul de comandă, fasciculul de electroni este focalizat pe ecranul tubului catodic cu o lentilă electronică formată din cei doi anozi, de focalizare și de accelerare.

● **Anodul de focalizare** *3* este un cilindru care are un potențial pozitiv față de catod (cîteva sute de volți), reglabil cu potențiometrul R_A. Variind acest potențial se reglează distanța focală a lentilei electronice, astfel încît focarul ei să cadă pe ecran. Cînd reglajul este corect, imaginea de pe ecran are claritatea maximă.

● **Anodul de accelerare** *4* este tot de formă cilindrică și are un potențial fix, pozitiv față de catod, de ordinul miilor de volți. El are rolul de a accelera mișcarea electronilor, determinînd viteza v_0 cu care aceștia se îndreaptă spre ecran.

b. DISPOZITIVUL DE DEFLEXIE

Deviația fasciculului de electroni se poate realiza cu cîmpuri electrostatice sau magnetice. La tuburile catodice folosite în osciloscoape se utilizează deviația cu cîmpuri electrostatice; dispozitivul de deflexie este format din două perechi de plăci de deflexie dispuse perpendicular una pe alta, pentru devierea fasciculului de electroni după cele două direcții, *x* și *y*.

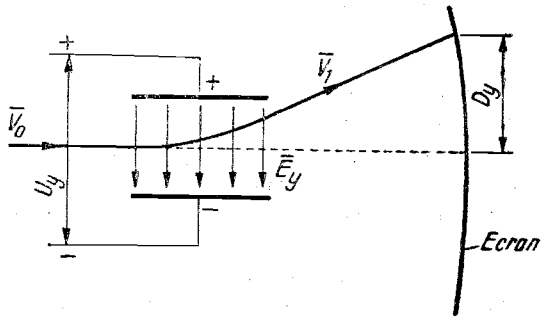


Fig. 6.5. Deviația fasciculului de electroni.

Cînd plăcile sînt la același potențial, fasciculul de electroni trece printre ele fără a fi deviat și lovește ecranul în centru.

Dacă se aplică plăcilor de deflexie *5* o tensiune U_y (fig. 6.5), între ele apare un cîmp electric E_y. Sub acțiunea acestui cîmp, electronii vor fi atrași de placa mai pozitivă și respinși de placa mai negativă cu o forță $F_y = e \cdot E_y$, care va imprima electronilor o accelerație a_y după direcția y. Ca urmare, în spațiul dintre plăci electronii vor avea atît o mișcare uniformă cu viteza v_0 în lungul tubului, cît și o mișcare uniform accelerată pe direcția y. În urma combinării celor două mișcări, rezultă o traiectorie parabolică.

Cînd electronii ies dintre plăci, acțiunea cîmpului E_y **încetează** și ei își continuă mișcarea după o direcție tangentă la traiectoria parabolică, lovind ecranul la o distanță D_y față de centru. Deviația spotului pe ecran D_y este cu atît mai mare cu cît tensiunea U_y aplicată plăcilor y este mai mare.

Analog, dacă se aplică plăcilor *6* o diferență de potențial, între ele apare un cîmp electric care deviază fasciculul de electroni pe direcția orizontală.

Cînd pe ambele perechi de plăci se aplică simultan cîte o diferență de potențial, fasciculul de electroni va fi deviat după o direcție rezultantă a acțiunii celor două cîmpuri.

c. ECRANUL

După ce au trecut prin sistemul de deflexie, electronii ajung pe ecran (*7*) producînd spotul luminos. Rolul ecranului este de a transforma o parte cît mai mare din energia cinetică a electronilor în energie luminoasă. În acest scop, pe suprafața interioară a ecranului, este depusă o substanță fluorescentă numită luminofor, care devine luminoasă cînd este bombardată de electroni. Pentru a i se mări eficacitatea, se adaugă diferite substanțe activante.

Culoarea spotului luminos depinde de compoziția substanței fluorescente. Pentru observări vizuale se folosesc ecrane cu fluorescență galben-verzuie, deoarece sensibilitatea ochiului este maximă în acest domeniu. Materialul folosit pentru aceste ecrane este wilemitul (ortosilicat de zinc) activat cu magneziu.

După încetarea bombardării cu electroni, ecranul continuă să emită lumină un timp oarecare. Persistența luminii depinde de materialul luminoforului, ea putînd varia între milisecunde și cîteva secunde.

După ce au lovit ecranul, electronii sînt colectați de electrodul de ecranare *8*, depus pe suprafața interioară a părții tronconice a tubului catodic. Pe această cale, electronii se întorc la sursa de alimentare.

3. GENERATORUL BAZĂ DE TIMP

Generatorul bază de timp este blocul funcțional al osciloscopului catodic în care se generează tensiunea de forma dinților de ferăstrău ce se aplică plăcilor X în cazul vizualizării curbelor ce reprezintă *variația în timp a diferitelor mărimi*.

● **Condiții impuse tensiunii bază de timp.** Deoarece timpul se scurge uniform, este necesar ca *tensiunea aplicată plăcilor X să crească liniar*, deplasînd spotul cu viteză uniformă de la stînga la dreapta, iar *apoi să scadă brusc*, pentru a reîncepe o nouă variație. În intervalul de timp t_1—t_0 cînd tensiunea u_x crește, spotul se deplasează de la stînga la dreapta, descriind pe ecran curba dorită. Forma ideală a tensiunii u_x este cea desenată cu linie plină în figura 6.6, *a*. În practică, însă, nu se poate obține o astfel de variație. Semnalele obținute cu circuitele reale nu sînt perfect liniare și anularea lor nu se face instantaneu, ci într-un interval de timp finit $t_2 - t_1$ (fig. 6.6, *a* — linie punctată).

Datorită acestor diferențe între forma reală și forma ideală a tensiunii u_x, apar unele neajunsuri, care trebuie să fie minimizate:

— din cauza neliniarității, spotul nu se deplasează pe ecran cu viteză constantă și, ca urmare, curba ce apare pe ecran este deformată față de curba reală;

— deoarece tensiunea u_x nu scade instantaneu, în intervalul de timp $t_2 - t_1$, cînd tensiunea scade, spotul se întoarce de la dreapta la stînga descriind pe ecran o linie de întoarcere care nu face parte din semnal.

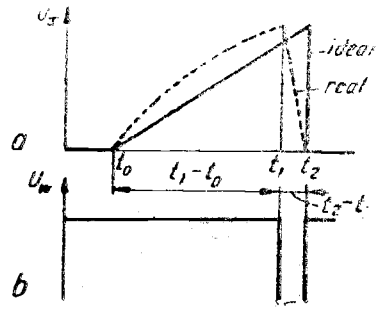


Fig. 6.6. Forma reală și forma ideală a tensiunii u_x (*a*); tensiunea care trebuie aplicată cilindrului Wehnelt (*b*).

Pentru a evita apariția liniei de întoarcere, în intervalul de timp $t_2—t_1$ se aplică cilindrului Wehnelt un impuls negativ (fig. 6.6, *b*) care blochează fasciculul de electroni și spotul se stinge. În acest mod, pe ecran nu se mai vede linia de întoarcere dar, în același timp, nu se mai vede nici partea finală a oscilogramei. Pentru ca partea care se pierde din oscilogramă să fie cît mai mică, este necesar ca intervalul de timp $t_2—t_1$ în care tensiunea u_x scade să fie mult mai mic decît intervalul de timp $t_1 — t_0$.

O altă condiție pe care trebuie să o îndeplinească baza de timp, pentru ca imaginea să fie stabilă pe ecran, este ca *frecvența sa să fie un submultiplu întreg al frecvenței semnalului de vizualizat*:

$$f_{BT} = \frac{1}{n} f_x; \quad n = 1, 2, 3, \ldots \tag{6.4}$$

● **Schema de principiu pentru generarea tensiunii bază de timp.** Ținînd seama de condițiile impuse tensiunii u_x, s-au realizat diferite construcții de generatoare bază de timp. În principiu însă, toate schemele adoptate se bazează pe încărcarea și descărcarea unui condensator.

Modelul cel mai simplu al generatorului de bază de timp este reprezentat în figura 6.7. La închiderea întrerupătorului K_1, la momentul $t = 0$, condensatorul C se încarcă de la sursa E prin rezistența R, după o lege exponențială (fig. 6.8):

$$U_C = E\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \tag{6.5}$$

Încărcarea este cu atît mai lentă cu cît constanta de timp $\tau_1 = RC$ este mai mare.

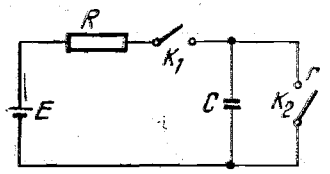


Fig. 6.7. Modelul unui generator bază de timp.

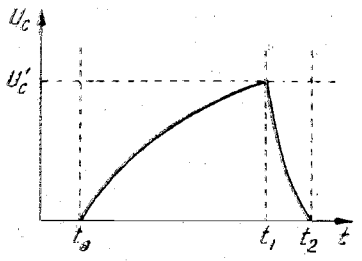


Fig. 6.8. Variația tensiunii la bornele condensatorului C.

La momentul $t = t_1$, cînd tensiunea pe condensator are valoarea U'_C, se închide întrerupătorul K_2, ce prezintă o rezistență de contact r de valoare mică. Începînd din acest moment, condensatorul C se descarcă pe rezistența de contact 5, de valoare mică, conform relației:

$$U_C = U'_C e^{-\frac{t}{rC}}. \tag{6.6}$$

Descărcarea va fi cu atît mai rapidă cu cît constanta de timp $\tau_2 = rC$ este mai mică. Pentru satisfacerea condiției $(t_2 — t_1) \ll (t_1 — t_0)$, este necesar ca $r \ll R$.

În cazul în care generatorul bază de timp funcționează periodic, această variație a tensiunii pe condensatorul C trebuie să repete periodic, adică comutatorul K_2 să se închidă și să se deschidă periodic, cu o frecvență care să satisfacă relația (6.4). În practică, comutatorul K_2 este realizat cu diferite dispozitive electronice.

● **Reglarea vitezei de deplasare a spotului (reglarea frecvenței bazei de timp).** Durata unui dinte de ferăstrău corespunde intervalului de timp $t_1 — t_0$ în care tensiunea pe condensator crește pînă la valoarea U'_C necesară devierii fasciculului de electroni, astfel încît spotul să se deplaseze pe tot ecranul de la stînga la dreapta. Ea depinde de constanta de timp $\tau_1 = RC$. Dacă se variază valorile lui R și C, se pot obține durate diferite pentru dinții de ferăstrău (fig. 6.9). De obicei, această durată se variază în trepte cu un comutator ce introduce în circuit condensatoare de diferite valori și fin prin variația continuă a rezistenței R. Comutatorul este calibrat în ms/cm sau μs/cm, corespunzător timpului necesar ca spotul să se deplaseze pe direcția orizontală cu 1 cm. Această calibrare este valabilă numai dacă reflajul fin este la maxim.

În cazul funcționării periodice, se poate considera că durata unui dinte de ferăstrău corespunde unei perioade a semnalului generat de baza de timp, deci variind durata dinților de ferăstrău se variază frecvența bazei de timp.

● **Liniarizarea tensiunii generate de baza de timp.** După cum reiese din relația (6.5) în

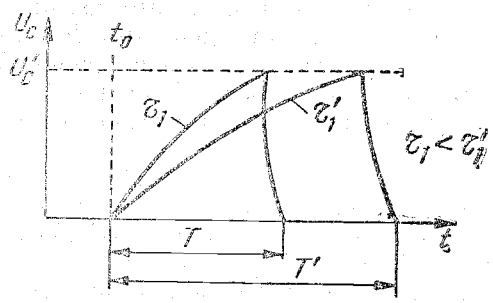


Fig. 6.9. Variația duratei dinților de ferăstrău în funcție de valoarea constantei de timp $\tau = RC$.

cazul încărcării unui condensator de la o sursă de tensiune constantă E, tensiunea la bornele condensatorului variază după o lege exponențială, deci prezintă o variație neliniară. Pentru a se evita acest neajuns, este necesar ca încărcarea condensatorului C să se facă sub curent constant.

Exprimînd tensiunea pe condensator prin raportul între cantitatea de sarcină electrică Q ce se acumulează pe condensator și capacitatea C, se obține:

$$U_C = \frac{Q}{C}. \tag{6.7}$$

În cazul încărcării sub curent constant, $Q = It$ și, ținînd seama că I și C sînt constante, se poate scrie:

$$U_C = \frac{It}{C} = Kt. \tag{6.8}$$

Relația (6.8) arată că în cazul încărcării sub curent constant variația tensiunii pe condensator în funcție de timp este liniară.

În osciloscoapele moderne, încărcarea condensatorului sub curent constant se realizează fie folosind amplificatoare operaționale integratoare, fie folosind generatoare de curent constant cu tranzistoare.

4. OSCILATOARE CU DOUĂ SPOTURI SAU CU DOUĂ CANALE

Pentru vizualizarea simultană a două semnale, se construiesc *osciloscoape cu două spoturi* sau *osciloscoape cu două canale*.

● **Osciloscoapele cu două spoturi** utilizează tuburi catodice speciale, care conțin în același balon două sisteme electronooptice, adică sînt prevăzute cu două tunuri de electroni și cu cîte două dispozitive de deflexie pentru X și Y. Cele două sisteme electronooptice sînt *comandate independent*, prin circuite asemănătoare cu cele ale unui osciloscop obișnuit, cu excepția generatorului bază de timp care este comun.

● **Osciloscoapele cu două canale** folosesc pentru vizualizarea simulatană a două semnale o metodă mai simplă și mai elegantă. Ele sînt prevăzute cu un tub catodic obișnuit și cu un *comutator electronic* (fig. 6.10).

Comutatorul electronic este un circuit electronic care primește la două intrări distincte două semnale diferite pe care le comută succesiv pe plăcile de deflexie verticală ale unui tub catodic. Pe ecranul tubului, datorită persistenței luminoforului, apar simultan oscilogramele celor două semnale. Comutarea se face fie cu frecvența benzii de timp (în timpul unui dinte de ferăstrău se vizualizează un semnal, iar în timpul următorului dinte de ferăstrău — celălalt semnal), fie cu o frecvență mult mai mare.

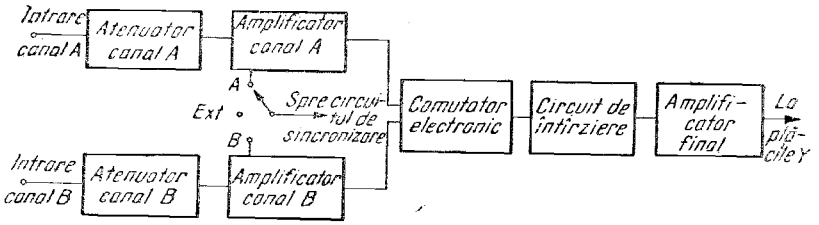


Fig. 6.10. Circuitele sistemului de deviație pe verticală la un osciloscop cu două canale.

C. MĂSURĂRI CU AJUTORUL OSCILOSCOPULUI

În afară de vizualizarea formei semnalelor, osciloscopul catodic mai are numeroase utilizări în tehnica măsurărilor electrice, electronice și magnetice.

1. MĂSURAREA TENSIUNILOR

Măsurarea tensiunilor cu osciloscopul catodic se bazează pe faptul că deviația spotului este proporțională cu amplitudinea tensiunii aplicate plăcilor de deflexie. Se pot utiliza diferite metode de măsurare.

a. METODA DIRECTĂ

Metoda directă se utilizează în cazul osciloscoapelor moderne, prevăzute cu ecran caroiat (împărțite în pătrate cu latura de obicei de 1 cm) și care au atenuatorul A_y etalonat în mV/cm sau V/cm.

Înainte de utilizare, *se recomandă să se verifice calibrarea atenuatorului* A_y. În acest scop, osciloscoapele dispun, la o bornă de pe panoul frontal, de o tensiune de calibrare. Cu ajutorul unei sonde (cordon de legătură), se aplică tensiunea de calibrare la intrarea osciloscopului și se verifică dacă tensiunea obținută pe ecran corespunde indicației atenuatorului.

De exemplu, la osciloscopul tip E 0101 fabricat la I.E.M.I. București tensiunea de calibrare este de 2 V. Se aplică această tensiune la intrarea Y a osciloscopului și se așază atenuatorul pe poziția 2 V/cm. În acest caz, dacă reglajul amplificării este la maxim, pe ecran trebuie să apară o oscilogramă avînd înălțimea de 1 cm.

Modul de lucru. Se aplică semnalul de măsurat la intrarea Y a osciloscopului, se controlează dacă reglajul amplificării este la maxim, și se reglează atenuatorul A_y și baza de timp astfel încît să se obțină o oscilogramă corect încadrată în ecran (fig. 6.11). Se măsoară cu ajutorul caroiajului de pe ecran înălțimea oscilogramei în centimetri și se înmulțește cu indicația atenuatorului, obținîndu-se astfel direct valoarea tensiunii măsurate.

De exemplu, în cazul oscilogramei din figura 6.11, dacă atenuatorul este pus pe poziția 0,5 V/cm, valoarea tensiunii este $U = 0{,}5 \times 2{,}4 = 1{,}2$ V.

b. METODA COMPARAȚIEI

Cînd osciloscopul nu are atenuatorul calibrat sau calibrarea nu mai este corectă, se poate folosi metoda comparației. La această metodă, tensiunea de măsurat, de o formă oarecare, se compară cu o tensiune sinusoidală de joasă frecvență, care poate fi măsurată cu un voltmetru obișnuit.

Modul de lucru. Se realizează montajul din figura 6.12. Cu comutatorul K pe poziția *1* se aplică la intrarea Y a osciloscopului tensiunea U_x de măsurat. Se reglează amplificarea și baza de timp pînă se obține o oscilogramă corect încadrată în ecran și se măsoară înălțimea l a oscilogramei.

Fără a interveni la reglajul amplificării, se trece comutatorul K pe poziția *2*, aplicîndu-se la intrarea Y a osciloscopului o tensiune sinusoidală de joasă frecvență. Aceasta se reglează pînă cînd oscilograma obținută pe ecran are aceeași înălțime l ca și în cazul vizualizării tensiunii U_x.

Cele două oscilograme avînd aceeași înălțime, înseamnă că amplitudinea tensiunii U_x este egală cu amplitudinea vîrf la vîrf a tensiunii sinusoidale.

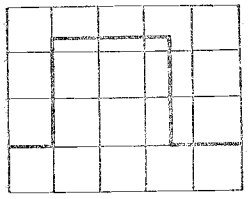


Fig. 6.11. Măsurarea directă a tensiunii cu osciloscopul catodic.

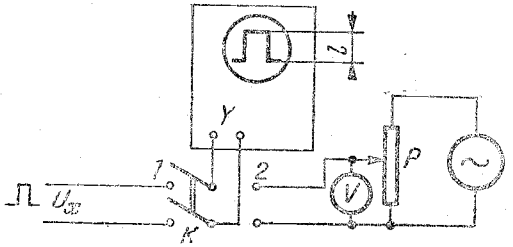


Fig. 6.12. Măsurarea tensiunii prin metoda comparației.

Tensiunea sinusoidală se măsoară cu voltmetrul V, care de obicei este etalonat în valori eficace. Dacă U este tensiunea citită pe voltmetru, atunci:

$$U_x = U_{vv} = 2U_{max} = 2\sqrt{2}\,U.$$

2. MĂSURAREA INTENSITĂȚII CURENTULUI ELECTRIC

Întrucît osciloscopul catodic funcționează cu deflexie electrostatică, semnalele ce se aplică la intrarea lui sînt de natura unor tensiuni.

Pentru măsurarea intensității curentului cu osciloscopul catodic, se trece curentul de măsurat printr-o rezistență de valoare cunoscută și se măsoară cu una din metodele studiate în paragraful precedent căderea de tensiune la bornele rezistenței. Apoi, aplicînd legea lui Ohm, se calculează valoarea intensității curentului de măsurat.

3. MĂSURAREA INTERVALELOR DE TIMP

Măsurarea intervalelor de timp se poate realiza cunoscînd viteza de deplasare a spotului și măsurînd pe ecran lungimea segmentului care corespunde intervalului de timp considerat.

Osciloscoapele moderne au baza de timp calibrată în ms/cm sau μs/cm, adică se indică pentru fiecare poziție a comutatorului ce regleaă în trepte frecvența bazei de timp, timpul necesar pentru ca spotul să se deplaseze pe direcție orizontaîă cu un centimetru. Această calibrare este corectă numai dacă reglajul fin al bazei de timp este la maxim.

a. MĂSURAREA DURATEI UNUI SEMNAL

Pentru măsurarea duratei unui semnal, acesta se aplică la intrarea Y a osciloscopului și se reglează amplificarea și baza de timp pînă cînd se obține o oscilogramă corect încadrată în ecran.

Se verifică dacă reglajul fin al bazei de timp este la maxim. Apoi se măsoară lățimea semnalului pe ecran, în centimetri, și se înmulțește cu indicația reglajului în trepte al bazei de timp, obținîndu-se astfel durata semnalului de măsurat.

De exemplu, în cazul oscilogramei din figura 6.11, dacă reglajul în trepte al bazei de timp este pe poziția 1 ms/cm și lățimea impulsului este de 2,5 cm, durata impulsului va fi $\tau = 2{,}5 \times 1 = 2{,}5$ ms.

În mod analog se poate măsura și durata unei părți din semnal, cum ar fi durata timpului de creștere a unui impuls (timpul în care semnalul crește de la 10% la 90% din amplitudinea sa !).

b. MĂSURAREA PERIOADEI UNUI SEMNAL

Pentru măsurarea perioadei, este necesar ca baza de timp să fie astfel reglată încît oscilograma să conțină cel puțin două perioade succesive ale semnalului. În acest caz, dacă reglajul fin al bazei de timp este la maxim, se măsoară pe ecran în centimetri distanța între două treceri succesive ale semnalului prin aceeași valoare și cu același semn de variație și se înmulțește cu indicația reglajului în trepte al bazei de timp. În acest fel, se obține direct perioada semnalului.

4. MĂSURAREA FRECVENȚELOR

Frecvența se poate măsura cu osciloscopul catodic, *măsurînd perioada semnalului* ca la punctul precedent și apoi calculînd frecvența cu relația bine cunoscută: $f = \frac{1}{T}$. Această metodă nu asigură însă o precizie bună.

Măsurări mai precise se pot obține folosind unele metode de comparație, cum ar fi: *metoda figurilor lui Lissajous, metoda modulării intensității spotului, metoda oscilogramelor duble* etc.

a. METODA FIGURILOR LUI LISSAJOUS

Dintre metodele de comparație, metoda figurilor lui Lissajous este cea mai frecvent folosită.

Lissajous, fizician francez (1822 — 1880), a studiat compunerea a două oscilații sinusoidale ale căror direcții de oscilație sînt perpendiculare. El a constatat că dacă raportul frecvențelor celor două oscilații este un număr rațional $\left(\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n}, m \text{ și } n \text{ fiind numere întregi}\right)$, se

obțin figuri a căror formă depinde de raportul frecvențelor celor două oscilații și de defazajul dintre ele (fig. 6.13).

Figurile lui Lissajous se pot obține pe ecranul osciloscopului catodic dacă se aplică ambelor perechi de plăci de deflexie *tensiuni sinusoidale*.

Modul de lucru. Pentru măsurarea frecvenței f_x a unui semnal, acesta se aplică unei perechi de plăci de deflexie a osciloscopului, iar la cealaltă pereche de plăci de deflexie se aplică un semnal de la un generator de frecvență variabilă și cunoscută, f_0 (fig. 6.14, *a*). Se variază frecvența f_0 pînă cînd pe ecran se obține una dintre figurile lui Lissajous. Pentru a determina raportul corespunzător figurii obținute pe ecran, se intersectează figura cu două drepte, una orizontală (x) și una verticală (y) și se numără punctele de intersecție ale figurii cu cele două drepte (fig. 6.14, *b*). Pentru orice figură a lui Lissajous raportul între numărul de intersecții n_x cu dreapta orizontală și numărul de intersecții n_y cu dreapta verticală este egal cu raportul între frecvența semnalului aplicat plăcilor Y și frecvența semnalului aplicat plăcilor X:

$$\frac{n_x}{n_y} = \frac{f_y}{f_x}. \qquad (6.7)$$

Cunoscînd raportul corespunzător figurii obținute pe ecran și frecvența f_0, se poate determina frecvența f_x folosind relația (6.7).

○ **Observație.** De obicei, se variază f_0 pînă cînd se obțin figurile corespunzătoare egalității celor două frecvențe $\left(\frac{f_x}{f_y} = 1\right)$.

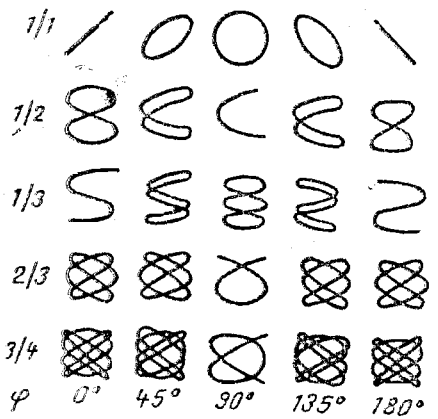


Fig. 6.13. Figurile lui Lissajous.

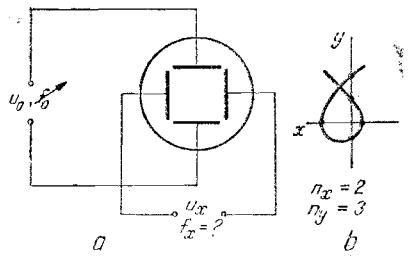


Fig. 6.14. Măsurarea frecvențelor cu figurile lui Lissajous.

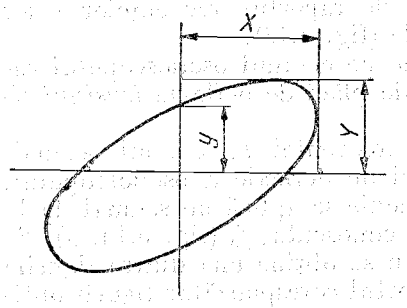


Fig. 6.15. Măsurarea defazajelor.

4. MĂSURAREA DEFAZAJELOR

În paragraful precedent s-a arătat că figurile lui Lissajous depind de raportul frecvențelor a două oscilații dar și de defazajul dintre ele.

Pentru determinarea defazajului dintre două semnale de aceeași frecvență, acestea se aplică celor două perechi de plăci de deflexie ale osciloscopului. În acest caz:

$$u_x = U_{x\,max} \sin \omega t; \qquad u_y = U_{y\,max} \sin (\omega t + \varphi). \tag{6.8}$$

Deviațiile obținute pe ecran fiind în fiecare moment proporționale cu tensiunile aplicate, vor varia după expresiile:

$$x = X \sin \omega t; \qquad y = Y \sin (\omega t + \varphi), \tag{6.9}$$

unde X și Y sînt deviațiile maxime. Pe ecran apare o figură de forma unei elipse, care pentru $\varphi = 0$ și $\varphi = \pi$ degenerează într-o linie înclinată, iar pentru $\varphi = \frac{\pi}{2}$ și $\varphi = \frac{3\pi}{2}$ devine un cerc (v. fig. 6.13).

În cazul general, dacă elipsa este bine centrată pe ecran (fig. 6.15), defazajul se poate determina prin raportul între deviația maximă pe verticală, Y, și deviația y corespunzătoare punctului în care elipsa intersectează axa verticală a ecranului. În acest punct $x = 0$, deci $\omega t = 0$ și $y = Y \sin \varphi$. Din această relație se deduce:

$$\sin \varphi = \frac{y}{Y}. \tag{6.10}$$

○ **Observație.** *În cazul în care se dispune de un osciloscop cu două canale* (cu comutator electronic), măsurarea defazajului dintre două semnale se poate realiza mai comod vizualizînd simultan cele două semnale.

5. VIZUALIZAREA CARACTERISTICILOR

O caracteristică este reprezentarea grafică a dependenței dintre două mărimi ce caracterizează un aparat, un dispozitiv sau un material (de exemplu: caracteristica unei diode, $i = f(u)$; caracteristicile tranzistoarelor, $I_C = f(U_{CE})$; caracteristicile de magnetizare ale materialelor feromagnetice, $B = f(H)$ etc.).

La reprezentarea grafică a caracteristicilor se folosesc două axe rectangulare. Deplasarea spotului la osciloscop se face de asemenea după două axe rectangulare, iar deviațiile sînt proporționale cu tensiunile ce se aplică celor două perechi de plăci de deflexie.

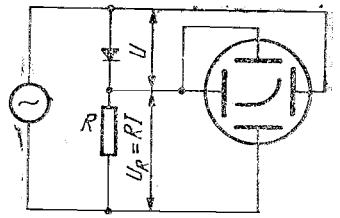


Fig. 6.16. Montajul pentru vizualizarea caracteristicii $I = f(U)$ a unei diode.

Această analogie face posibilă vizualizarea pe ecranul osciloscopului catodic a oricărei curbe de tipul $A = f(B)$.

VIZUALIZAREA CARACTERISTICII UNEI DIODE

Caracteristica $I = f(U)$ a unei diode se poate vizualiza folosind montajul din figura 6.16. Plăcilor X li se aplică tensiunea U de la bornele diodei, iar plăcilor Y trebuie să li se aplice o tensiune proporțională cu curentul diodei. În acest scop, în serie cu dioda s-a montat o rezistență R la bornele căreia se culege tensiunea $U_R = RI$, care se aplică plăcilor Y.

Pentru a obține caracteristica $I = f(U)$, tensiunea U trebuie să ia diferite valori. De aceea, dioda trebuie alimentată în curent alternativ.

Probleme și întrebări recapitulative

1. De ce osciloscopul catodic este unul dintre cele mai răspîndite aparate electronice?
2. Care sînt reglajele de care depinde calitatea imaginii de pe ecran?
3. Care este principiul de funcționare al bazelor de timp?
4. Ce se întîmplă la un osciloscop, cînd se vede linia de întoarcere a spotului?
5. Dacă frecvența bazei de timp este de 1 000 Hz și lățimea ecranului este de 10 cm, pe ce poziție trebuie să fie comutatorul calibrat în ms/cm?
6. Dacă pe ecranul unui osciloscop apar cinci sinusoide și frecvența semnalului de vizualizat este 1 000 Hz, cît este frecvența bazei de timp?

CAPITOLUL 7

VOLTMETRE ELECTRONICE

A. GENERALITĂȚI

Voltmetrele electronice sînt aparate destinate să măsoare tensiuni și conțin în construcția lor componente electronice.

Voltmetrele electronice au devenit necesare deoarece — deși mai simple și mai ieftine — voltmetrele neelectronice nu mai dau satisfacție în condițiile tehnicii moderne, ele prezentînd anumite limitări în funcționare (bandă de frecvențe redusă, sensibilitate relativ mică, impedanță de intrare mică și dependentă de valoarea tensiunii măsurate, consum mare de putere de la circuitul de măsurat).

1. UTILIZĂRI

Voltmetrele electronice au apărut și s-au dezvoltat odată cu electronica însăși, urmărind nivelul de dezvoltare al acesteia și răspunzînd nevoilor impuse de aplicațiile ei în practică. Ca urmare, ele au fost astfel realizate încît să poată fi utilizate la:

— măsurarea tensiunilor în audio și radiofrecvență;
— măsurarea tensiunilor la bornele unor impedanțe mari;
— măsurarea tensiunilor continue și alternative foarte mici;
— măsurarea tensiunilor în circuite alimentate de la surse de mică putere.

2. PROPRIETĂȚI

Voltmetrele electronice prezintă o serie de caracteristici tehnice care le impun în măsurătorile de tensiuni din circuitele electronice:

— funcționează într-o bandă largă de frecvențe, de la curent continuu pînă la gigaherți;

— sensibilitatea lor poate fi foarte mare; în prezent se construiesc voltmetre electronice care pot măsura tensiuni începînd de la ordinul nanovolților; de asemenea, există și voltmetre electronice care pot măsura tensiuni foarte mari, de ordinul zecilor de kilovolți;

— impedanța de intrare este foarte mare. Ea poate fi considerată ca o rezistență de intrare de ordinul megohmilor în paralel cu o capacitate de intrare de ordinul picofarazilor. În unele variante constructive, rezistența de intrare poate atinge valori de ordinul miilor de megohmi;

— impedanța de intrare nu depinde de valoarea tensiunii măsurate, ea rămânînd de obicei aceeași cînd se schimbă intervalul de măsurare;

De exemplu, un voltmetru cu mai multe intervale de măsurare, prezintă o rezistență de intrare de 10 MΩ și pe scara de 1 V, și pe scara de 300 V.

— consumul de putere de la circuitul de măsurat este foarte mic.

Voltmetrele electronice prezintă și unele *neajunsuri*. Astfel, precizia voltmetrelor electronice, cu excepția celor numerice, nu este foarte bună datorită diferitelor influențe (variații de tensiune, de temperatură) pe care le suferă în funcționarea lor componentele electronice. În general, voltmetrele electronice se încadrează în clasele de precizie 1—5. Un alt dezavantaj este faptul că voltmetrele electronice necesită o sursă de alimentare.

3. CLASIFICARE

Voltmetrele electronice se realizează într-o mare varietate de tipuri constructive, ceea ce face utilă o clasificare a lor.

- **După felul indicației,** voltmetrele electronice pot fi:

— *voltmetre analogice*, la care indicația variază continuu;
— *voltmetre digitale*, la care indicația se exprimă numeric.

- **După felul curentului,** se deosebesc:

— *voltmetre electronice de curent continuu;*
— *voltmetre electronice de curent alternativ;*
— *voltmetre electronice de curent continuu și alternativ.*

- **După componentele electronice folosite,** pot fi:

— *voltmetre electronice cu diode;*
— *voltmetre electronice cu tranzistoare;*
— *voltmetre electronice cu tuburi electronice.*

● **După valoarea tensiunii măsurate,** se deosebesc:
— *voltmetre electronice* (0,1 V—zeci de kilovolți);
— *milivoltmetre electronice* (mV—sute de volți);
— *microvoltmetre electronice* (μV—sute de volți);
— *nanometre electronice* (nV—sute de volți).

● **După relația între indicație și valoarea tensiunii măsurate,** se pot întîlni:
— *voltmetre de valoare eficace* ($\alpha = KU$);
— *voltmetre de valoare medie* ($\alpha = KU_{med}$);
— *voltmetre de valoare maximă* ($\alpha = KU_{max}$).

● **După felul circuitului de intrare,** se construiesc:
— *voltmetre cu intrare liberă*, care măsoară și componenta de curent continuu;
— *voltmetre cu intrarea blocată*, la care componenta de curent continuu este blocată cu un condensator montat în serie pe intrare și, ca urmare, aceste voltmetre măsoară numai componentele de curent alternativ.

B. VOLTMETRE ELECTRONICE DE CURENT CONTINUU

Voltmetrele electronice de curent continuu sînt aparate destinate măsurării tensiunilor continue de la 0,1 V la 1 000 V. Folosind sonde de înaltă tensiune, utilizarea lor poate fi extinsă pînă la zeci de kilovolți.

● **Principalele cerințe** impuse acestor aparate sînt:
— impedanță de intrare mare;
— erori cît mai mici;
— stabilitate în timp cît mai bună;
— gamă de măsurare cît mai mare.

● Pentru a satisface primele trei condiții, voltmetrele electronice de curent continuu se realizează dintr-un amplificator de curent continuu și un instrument magnetoelectric, conform **schemei bloc** din figura 7.1, *a*. Acest ansamblu nu poate lucra însă decît într-un domeniu foarte restrîns de tensiuni, de la zecimi de volt la cîțiva volți.

● Pentru a acoperi un interval mai mare de măsurare, pînă la circa 1 000 V, se realizează **voltmetre electronice cu mai multe scări.** În acest caz, amplificatorul se calculează pentru cea mai mică scară, urmînd ca la aplicarea unei tensiuni mai mari la intrare, aceasta să fie redusă corespunzător cu ajutorul unui divizor de tensiune, ca în schema din figura 7.1, *b*.

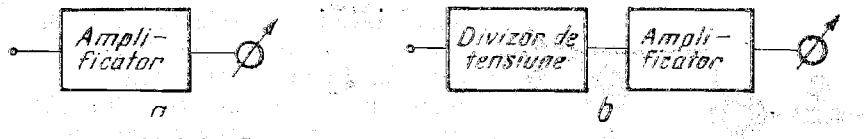


Fig. 7.1. Scheme bloc de voltmetre electronice de c.c.

Voltmetrele electronice de curent continuu pot fi realizate cu tuburi electronice sau cu tranzistoare. În continuare vor fi prezentate cîteva tipuri de voltmetre electronice cu tranzistoare.

1. VOLTMETRU ELECTRONIC DE C.C. CU UN TRANZISTOR

● **Cel mai simplu voltmetru electronic de curent continuu** ar putea fi realizat *cu un transformator în montaj emitor comun*, ca în figura 7.2. Tensiunea U_x aplicată la intrare produce în circuitul de intrare un curent I_B ce se aplică pe baza tranzistorului T. Dacă se notează cu R_{iT} rezistența de intrare a tranzistorului, curentul I_B va fi:

$$I_B = \frac{U_x}{R_B + R_{iT}} \qquad (7.1)$$

Conform ecuației fundamentale a tranzistorului în montaj emitor comun ($I_C = \beta I_B + I_{CEO}$), curentul din colector I_C este de β ori mai mare decît curentul din bază, β fiind factorul de amplificare în curent în montaj emitor comun și avînd valori de ordinul zecilor sau sutelor.

Înlocuind în ecuația fundamentală expresia lui I_B din relația (7.1), se obține:

$$I_C = \beta \frac{U_x}{R_B + R_{iT}} + I_{CEO}. \qquad (7.2)$$

Relația (7.2) arată că intensitatea curentului din colectorul tranzistorului depinde de valoarea tensiunii U_x aplicate la intrare, deci miliampermetrul *mA* montat în circuitul de colector se poate grada în valori ale tensiunii aplicate la intrare, obținîndu-se astfel un voltmetru de curent continuu.

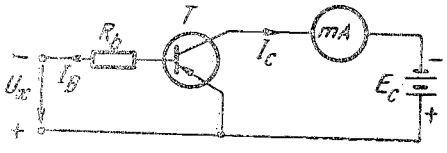


Fig. 7.2. Voltmetru electronic de c.c. cu un tranzistor.

● Voltmetrul prezentat în figura 7.2 este foarte simplu, dar prezintă o serie de **neajun-**

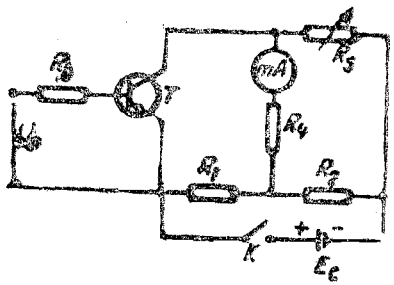


Fig. 7.3. Montajul repetor pe emitor.

suri. Astfel, în relația (7.2) se observă că în lipsa unei tensiuni aplicate la intrare, deci cînd $U_x = 0$, respectiv $I_B = 0$, curentul din colector nu este zero, miliampermetrul mA indicînd *curentul rezidual* I_{CEO}. Un alt dezavantaj este faptul că *funcționarea tranzistorului este influențată de variațiile de temperatură și de variațiile tensiunii de alimentare*. În plus, *rezistența de intrare*

$$R_i = \frac{U_x}{I_B} = R_B + R_{iT} \qquad (7.3)$$

este mică, de ordinul sutelor de kiloohmi, din cauza valorii mici a rezistenței de intrare a tranzistorului (în cazul montajului emitor comun — de ordinul kiloohmilor). De aceea schema 7.2 nu se utilizează în practică.

● **Pentru obținerea unei rezistențe de intrare de valoare mare,** *etajul de intrare* al voltmetrelor electronice este de obicei *de tipul repetor pe emitor* (fig. 7.3). În cazul unui astfel de etaj, rezistența de intrare este de aproximativ $(1 + \beta)$ ori mai mare decît rezistența R_E montată în emitor:

$$R_i = h_{11e} + (1 + \beta)R_E, \qquad (7.4)$$

unde h_{11e} este rezistența de intrare a tranzistorului în montaj emitor comun și are valori de ordinul kiloohmilor. Avînd în vedere că β are valori de ordinul zecilor sau sutelor și că rezistența R_E din emitor poate fi mai mare, cel puțin de ordinul kiloohmilor, se observă că rezistența de intrare a etajului repetor este mult mai mare decît rezistența de intrare a tranzistorului.

○ **Notă.** În voltmetrele electronice moderne, deseori în locul tranzistoarelor bipolare se utilizează tranzistoare cu efect de cîmp, care asigură o rezistență de intrare foarte mare.

2. VOLTMETRE ELECTRONICE DE C.C. ÎN PUNTE

Pentru compensarea curentului rezidual, în construcția voltmetrelor electronice se pot folosi scheme în punte.

● În figura 7.4 este reprezentată **schema de principiu a unui voltmetru electronic în punte, cu un singur tranzistor.** Tranzistorul, care are

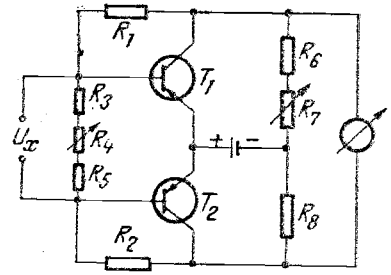


Fig. 7.4. Voltmetru electronic de c.c. în punte, cu un tranzistor.

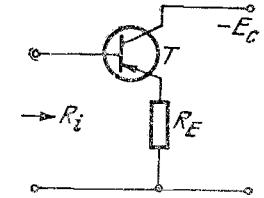


Fig. 7.5. Voltmetru electronic de c.c. în punte, cu două tranzistoare.

rolul de amplificator de curent continuu, este montat într-unul dintre brațele punții, iar instrumentul indicator — pe una dintre diagonale.

● **Funcționarea.** *În lipsa tensiunii de măsurat* ($U_x = 0$), puntea se echilibrează cu ajutorul rezistenței variabile R_3 și prin instrumentul indicator nu trece nici un curent. *Aplicînd la intrare o tensiune* U_x *diferită de zero*, se modifică curentul de colectare al tranzistorului, ceea ce duce la dezechilibrarea punții și la apariția unui curent prin miliampermetrul mA, curent care depinde de tensiunea U_x aplicată la intrare

● Voltmetrele electronice în punte, cu un singur tranzistor, nu asigură o stabilitate bună în timp, datorită influențelor variațiilor de temperatură și variațiilor tensiunii de alimentare asupra tranzistorului. Pentru înlăturarea acestui neajuns, se folosesc **montaje simetrice cu două tranzistoare** (fig. 7.5). Dacă tranzistoarele se aleg astfel încît să aibă caracteristici cît mai asemănătoare, datorită montajului simetric variațiile în funcționarea celor două tranzistoare se compensează, obținîndu-se astfel o bună stabilitate.

C. VOLTMETRE ELECTRONICE DE CURENT ALTERNATIV

Voltmetrele electronice de curent alternativ sînt formate în principiu din două părți distincte: *partea de detecție*, care transformă semnalul alternativ de măsurat într-un semnal continuu proporțional cu acesta, și *partea de măsurare propriu-zisă*.

Cele mai simple voltmetre electronice de curent alternativ se pot realiza dintr-un circuit de detecție și un instrument indicator magnetoelectric, ca în figura 7.6, *a*.

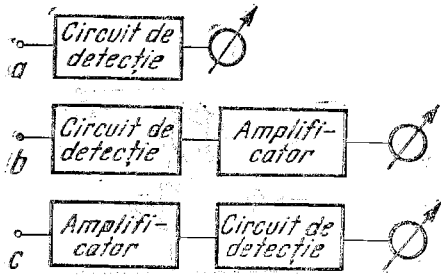


Fig. 7.6. Scheme bloc de voltmetre electronice de c.a.

Pentru a obține rezistențe mari de intrare, este necesar ca în circuitul de detecție să se folosească rezistențe foarte mari, de ordinul megohmilor sau zecilor de megohmi, ceea ce determină un curent foarte mic prin aparatul de măsurat, care în consecință trebuie să fie foarte sensibil. Pentru a evita folosirea unui astfel de aparat, care este foarte costisitor, voltmetrele electronice de curent alternativ sînt prevăzute de obicei și cu un *amplificator* care poate fi dispus înainte (fig. 7.6,*b*) sau după circuitul de detecție (fig. 7.6,*c*).

1. VOLTMETRE ELECTRONICE DE C.A. CU DIODE FĂRĂ AMPLIFICARE

Voltmetrele electronice fără amplificare se construiesc cu diode cu vid sau semiconductoare, care realizează funcția de detecție. Aceste voltmetre se utilizează rar în practică, dar circuitele de detecție cu diode sînt folosite frecvent în voltmetrele cu amplificare.

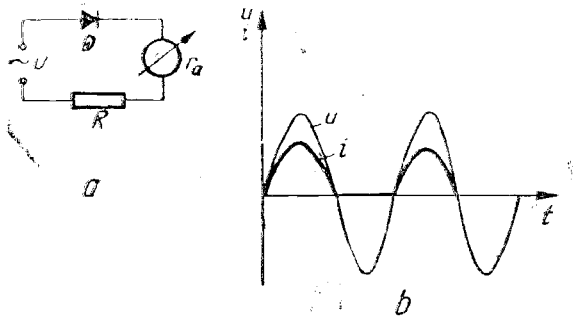
Voltmetrele electronice cu diode pot măsura, în mod obișnuit, valori medii ale tensiunii sau valori de vîrf (maxime).

a. VOLTMETRE ELECTRONICE CU DIODE, DE VALORI MEDII

Voltmetrele de valori medii cu diode sînt formate dintr-un instrument indicator magnetoelectric, o rezistență R de valoare foarte mare și o diodă. Dioda poate fi montată în serie (fig. 7.7, *a*), sau în paralel față de rezistența R și de instrumentul indicator. Varianta în paralel nu se folosește în practică, întrucît în una dintre alternanțe, cînd dioda conduce, scurtcircuitează intrarea voltmetrului, deci micșorează foarte mult rezistența de intrare.

În cazul variantei serie, dacă se aplică la intrare o tensiune alternativă $u = f(t)$, *în timpul alternanței în care pe anodul diodei se aplică*

Fig. 7.7. Voltmetre cu diode de valori medii.



o tensiune pozitivă, aceasta conduce și prin circuit va trece un curent a cărui intensitate i va urmări variațiile tensiunii aplicate la intrare (fig. 7.7, *b*):

$$i = \frac{u}{R + r_a + r_d} \cong \frac{u}{R}. \qquad (7.5)$$

În relația (7.5) s-a notat cu r_a rezistența instrumentului indicator, iar cu r_d — rezistența diodei în stare de conducție. Ambele rezistențe fiind foarte mici, se pot neglija față de R.

Cînd se schimbă alternanța și pe anodul diodei se aplică o tensiune negativă, aceasta nu conduce și, în consecință, curentul prin circuit este nul. Deci, la aplicarea unei tensiuni alternative la intrarea voltmetrului, prin instrumentul indicator va trece un curent pulsatoriu. Cuplul activ care ia naștere în aparatul magnetoelectric este proporțional cu acest curent dar, datorită inerției, echipajul mobil nu poate urmări variațiile cuplului activ și va fi acționat de un cuplu mediu proporțional cu valoarea medie a intensității curentului. Ca urmare, indicația aparatului magnetoelectric este proporțională cu valoarea medie a intensității curentului din circuit, și conform relației (7.5), și cu valoarea medie a tensiunii aplicate la intrare:

$$\alpha = KI_{med} = K\frac{U_{med}}{R}. \qquad (7.6)$$

b. VOLTMETRE ELECTRONICE CU DIODE, DE VALORI MAXIME (DE VÎRF)

Voltmetrele de valori maxime cu diode se caracterizează prin existența unui condensator C, care se încarcă rapid prin diodă într-o alternanță și se descarcă foarte încet în alternanța următoare, menținînd

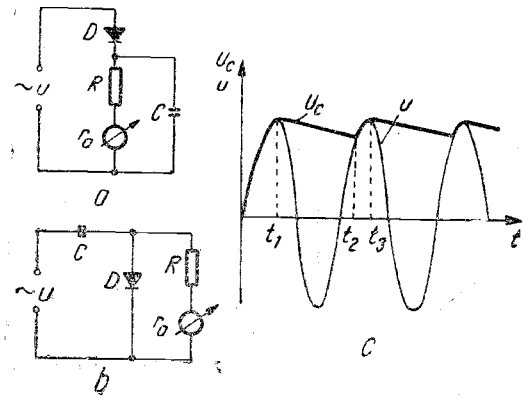


Fig. 7.8. Voltmetre de valori maxime, cu diode.

la bornele sale o tensiune aproximativ egală cu valoarea maximă a tensiunii măsurate.

Și în acest caz se pot întîlni două variante, *cu dioda în serie cu instrumentul indicator* (fig. 7.8, *a*) sau *cu dioda în paralel* (fig. 7.8, *b*). De această dată, ambele variante se folosesc în practică

● **În cazul variantei serie**, dacă se aplică o tensiune alternativă $u = f(t)$ la intrarea montajului, *în timpul alternanței pozitive* aplicate pe anodul diodei, dioda conduce și condensatorul C se încarcă prin rezistența de conducție a diodei care este de valoare mică. Constanta de timp de încărcare, $\tau_i = r_d\ C$ este mică și condensatorul se încarcă rapid, urmărind creșterea tensiunii de la intrare (fig. 7.8, *c*).

Cînd tensiunea de intrare începe să scadă, tensiunea pe condensator, aplicată cu „+" pe catodul diodei, devine mai mare decît tensiunea pozitivă aplicată pe anod și, ca urmare, dioda fiind polarizată invers, se blochează (momentul $t = t_1$ pe diagrama din fig. 7.8, *c*). Din acest moment, condensatorul C se descarcă prin instrumentul indicator și prin rezistența R. Deoarece rezistența R este de valoare foarte mare, constanta de timp de descărcare $\tau_d = RC$ este mare și condensatorul se descarcă lent, pînă cînd tensiunea aplicată la intrare devine din nou mai mare decît tensiunea U_C de pe condensator (momentul $t = t_2$). Începînd din acest moment, dioda este din nou polarizată direct și începe să conducă, condensatorul C se încarcă din nou pînă la valoarea maximă a tensiunii aplicate la intrare, apoi din nou tensiunea alternativă începe să scadă, U_C devine mai mare decît u, dioda se blochează, condensatorul se descarcă lent, și în acest fel fenomenul se repetă.

Pentru o constantă de timp $RC \gg T_{max}$ (T_{max} fiind perioda corespunzătoare celei mai joase frecvențe la care se folosește voltmetrul), între două alternanțe pozitive condensatorul se descarcă foarte puțin și tensiunea la bornele lui rămîne aproximativ egală cu valoarea maximă

a tensiunii de măsurat. În acest caz, intensitatea curentului prin instrumentul indicator va fi:

$$I = \frac{U_C}{r_a + R} \cong \frac{U_{max}}{R}. \qquad (7.7)$$

În relația (7.7) s-au făcut aproximațiile $R \gg r_a$ (r_a fiind rezistența aparatului indicator) și $U_C \cong U_{max}$.

● **Varianta constructivă cu dioda în paralel** are o funcționare asemănătoare, care conduce la aceleași concluzii ca și în cazul variantei serie.

c. VOLTMETRE ELECTRONICE DE VALORI EFECTIVE

În activitatea practică se folosesc rar voltmetrele gradate în valori medii sau în valori maxime. Cel mai frecvent se folosesc voltmetrele gradate în valori efective.

Se pot realiza și voltmetre a căror indicație să fie proporțională cu valoarea efectivă a tensiunii, oricare ar fi forma de variație în timp a acesteia, dar schemele unor astfel de aparate sînt mai complicate decît cele ale voltmetrelor de valori medii sau de valori maxime. De aceea, în practică se folosesc voltmetre de valori medii sau de valori maxime, care se gradează însă în valori efective.

○ **Atenție!** Această gradare nu este valabilă decît în cazul tensiunilor sinusoidale, în cazul altor forme de tensiuni ea ducînd la erori de măsurare.

In cazul unor tensiuni de formă sinusoidală, $u(t) = U_{max} \sin\omega t$, valoarea efectivă este $U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$. Valoarea medie pe o perioadă este zero, dar după detecție se obțin impulsuri corespunzătoare unei singure alternanțe. Valoarea medie pentru o alternanță este $U_{med} = \frac{U_{max}}{\pi}$. Pe baza proporționalității dintre valoarea maximă, valoarea medie și valoarea efectivă, voltmetrele de valori medii sau de valori maxime, se pot grada în valori efective.

2. VOLTMETRE ELECTRONICE DE C.A. CU AMPLIFICARE

Așa cum s-a spus deja, pentru a evita utilizarea unor instrumente indicatoare foarte sensibile se construiesc voltmetre electronice care conțin un amplificator montat înaintea circuitului de detecție sau după acesta (v. fig. 7.1, *b* și 7.1, *c*).

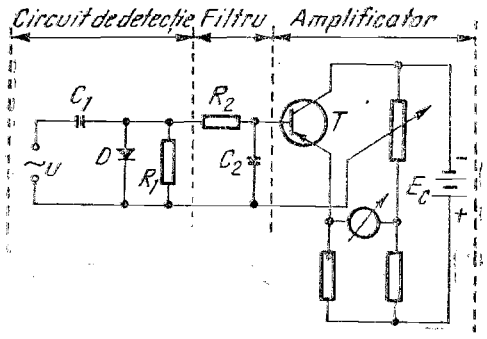


Fig. 7.9. Voltmetru de c.a. cu amplificator.

● **Voltmetre cu circuitul de detecție la intrare.** Circuitul de detecție transformă semnalul de c.a. într-un semnal de c.c., care se măsoară apoi cu un voltmetru de c.c. realizat într-una dintre variantele studiate. De exemplu, voltmetrul electronic de c.a. reprezentat în figura 7.9 conține un circuit de detecție format din C_1R_1 și dioda D și un amplificator de c.c. realizat cu tranzistorul T repetor pe emitor, montat într-o schemă în punte. Instrumentul indicator este conectat într-una dintre diagonalele punții. Între circuitul de detecție și amplificator este intercalat filtrul C_2R_2.

În cazul voltmetrelor care lucrează la frecvențe mari, circuitul de detecție împreună cu filtrul se realizează sub forma unui *cap de probă* ce se montează într-o carcasă separată, de dimensiuni mici și bine ecranată. Capul de probă se cuplează la voltmetrul propriu-zis printr-un cordon flexibil și poate fi astfel adus în imediata apropiere a punctului de măsurare, cu conexiuni foarte scurte.

● **Voltmetrele cu amplificator de c.a. la intrare** asigură o sensibilitate mai ridicată și o impedanță de intrare mare. După amplificare, semnalul alternativ este redresat și măsurat cu un instrument indicator magnetoelectric. Astfel se realizează milivoltmetre, microvoltmetre și nanovoltmetre electronice de c.a.

D. MILIVOLTMETRE ELECTRONICE

Milivoltmetrele electronice sînt aparate destinate să măsoare tensiuni foarte mici, de ordinul milivoltilor. Pentru a realiza acest lucru, milivoltmetrele conțin în construcția lor un amplificator care mărește tensiunea de măsurat pînă la o valoare suficientă pentru a fi aplicată unui circuit de măsurare.

Amplificatoarele folosite în milivoltmetre trebuie să prezinte:

— impedanță de intrare mare;
— amplificare mare;

— stabilitate bună în funcționare;
— distorsiuni neliniare foarte mici;
— zgomot de fond redus;
— bandă largă de frecvențe (pentru amplificatoarele de c.c.);
— derivă de curent mică (pentru amplificatoarele de c.a.).

Toate aceste condiții se îndeplinesc alegînd scheme electrice convenabile, care folosesc de obicei reacții negative puternice.

Pentru milivoltmetrele cu mai multe scări, amplificatorul se calculează pentru scara cea mai mică; în cazul măsurării unor tensiuni mai mari, acestea se reduc corespunzător cu un divizor de tensiune.

Milivoltmetrele pot fi *de curent alternativ* sau *de curent continuu*.

1. MILIVOLTMETRE ELECTRONICE DE CURENT ALTERNATIV

Milivoltmetrele electronice de c.a. sînt în mod obișnuit de tipul amplificator-detector. Amplificatoarele de c.a. folosite în milivoltmetre nu ridică probleme speciale, realizîndu-se ușor cerințele impuse unor astfel de amplificatoare.

În figura 7.10 este prezentată *schema unui milivoltmetru de c.a. care măsoară tensiuni de la 10 mV la 300 V, în 10 game, și funcționează în banda de frecvențe de 20 Hz... 3 MHz*. Impedanța de intrare este de 500 kΩ pentru gamele inferioare și 1 mΩ pentru gamele superioare. Pentru asigurarea unei impedanțe mari de intrare, amplificatorul are primele două etaje realizate sub forma a două repetoare pe emitor în cascadă. Divizorul de tensiune pentru primele cinci game (10 mV....1 V) este amplasat înaintea tranzistorului T_3 și este comandat de comutatorul S_c. Pentru ultimele cinci game (3 V...300 V) se introduce o atenuare suplimentară de 300 ori cu comutatorul S_a, montat la intrarea milivoltmetrului

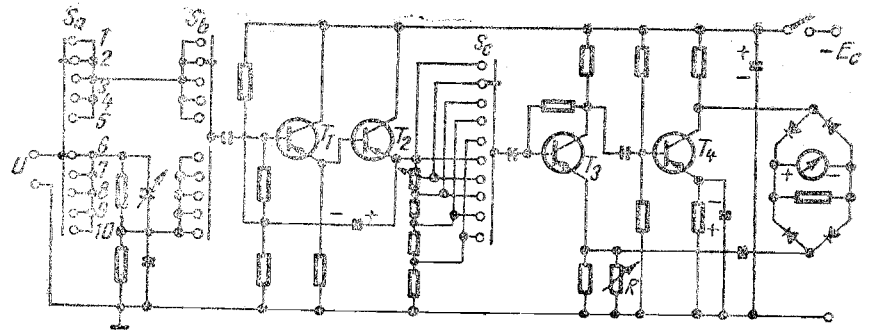


Fig. 7.10. Milivoltmetru de c.a.

Deoarece primele două tranzistoare în montaj emitor comun au o amplificare de aproximativ 1, amplificarea propriu-zisă se obține cu tranzistoarele T_3 și T_4.

Circuitul de detecție, realizat cu o punte de patru diode semiconductoare, este montat la ieșirea amplificatorului. Aparatul magnetoelectric din diagonala punții are indicațiile proporționale cu valoarea medie a tensiunii măsurate, dar este gradat în valori efective ale tensiunilor sinusoidale.

2. MILIVOLTMETRE ELECTRONICE DE CURENT CONTINUU

Milivoltmetrele electronice de c.c. necesită utilizarea unor amplificatoare de c.c. Acestea pot fi *cu cuplaj direct* sau *cu modulare-demodulare.*

a. MILIVOLTMETRE ELECTRONICE CU AMPLIFICATOARE CU CUPLAJ DIRECT

Amplificatoarele cu cuplaj direct au legăturile între etaje realizate direct sau prin rezistențe. O problemă deosebită a acestui tip de amplificatoare este deriva zeroului, ce se manifestă prin deviația indicației instrumentului indicator în jurul punctului de zero, în absența semnalului la intrare.

Datorită derivei, care se face simțită la variații de temperatură, milivoltmetrele cu cuplaj direct au o sensibilitate mai redusă.

Un *exemplu de milivoltmetru cu cuplaj direct* este reprezentat în figura 7.11. Aparatul are o impedanță de intrare de 1 MΩ și măsoară

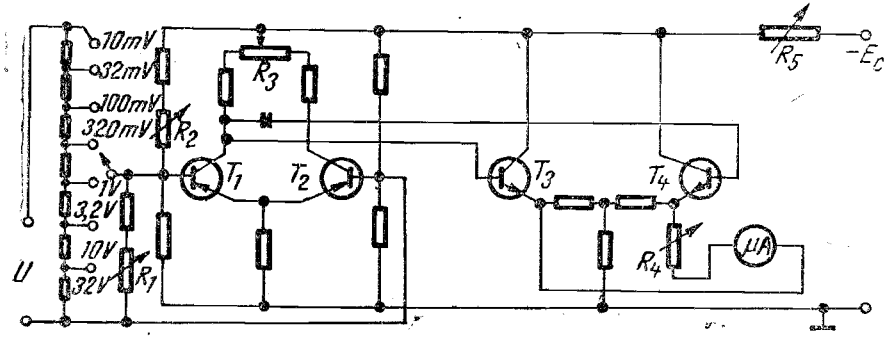


Fig. 7.11. Milivoltmetru de c.c. cu cuplaj direct.

tensiuni între 10 mV și 32 V, în opt game comandate de divizorul de tensiune prevăzut la intrare. Amplificatorul, de tip diferențial, are două etaje realizate cu tranzistoare cu siliciu. Instrumentul indicator este montat între emitoarele celui de-al doilea etaj. Nulul se reglează cu potențiometrele R_3 (intrare în scurtcircuit) și R_2 (intrarea în gol). Cu potențiometrul R_4 se calibrează capătul de scară al instrumentului indicator.

b. MILIVOLTMETRE DE C.C. CU MODULARE-DEMODULARE

Pentru a evita deriva termică, se folosesc amplificatoare de c.c. cu modulare-demodulare. Schema bloc a unui milivoltmetru realizat cu un astfel de amplificator este reprezentată în figura 7.12. Semnalul de

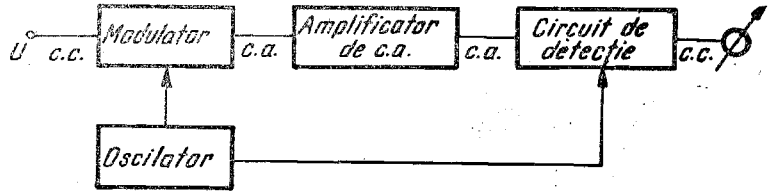


Fig. 7.12. Schema bloc a unui milivoltmetru de c.c. cu modulare-demodulare.

c.c. de măsurat este transformat într-un semnal de c.a.de un modulator comandat de un oscilator. Semnalul de c.a. obținut la ieșirea modulatorului este amplificat cu un amplificator de c.a., care se realizează mult mai ușor decît un amplificator de c.c. și fără derivă a zeroului. După amplificare se face o demodulare cu un circuit de detecție care transformă semnalul de c.a. amplificat într-un semnal de c.c. Circuitul de detecție funcționează sincron cu modulatorul, fiind comandat de același oscilator. Semnalul de c.c. obținut după detecție se măsoară cu un instrument indicator magnetoelectric.

E. MULTIMETRE ELECTRONICE

Multimetrele electronice sînt *aparate care conțin componente electronice și permit măsurarea mai multor mărimi electrice.* Ele se mai numesc și *voltmetre electronice universale,* deoarece construcția și funcționarea lor sînt, de fapt, cele ale unui voltmetru electronic.

● **Un multimetru conține** de obicei un voltmetru electronic de c.c. cu mai multe limite de măsurare. Cu ajutorul unor circuite auxiliare, aparatul poate măsura și alte mărimi. Astfel, prin introducerea unui circuit de detecție voltmetrul poate fi folosit și *la măsurarea tensiunilor alternative*. Circuitul de detecție este introdus de un comutator care alege funcționarea în c.c. sau în c.a.

Pentru măsurarea rezistențelor se utilizează de obicei o metodă de comparație: se măsoară cu voltmetrul căderea de tensiune de la bornele rezistenței de măsurat în comparație cu căderea de tensiune de la bornele unor rezistențe etalon.

Unele aparate sînt prevăzute cu circuite auxiliare *pentru măsurarea intensității curentului*. În acest caz, se măsoară cu voltmetrul căderea de tensiune la bornele unor rezistențe cunoscute, parcurse de curentul de măsurat. Rezistențele sînt astfel dimensionate încît căderea de tensiune la bornele lor să corespundă anumitor limite de măsurare pentru intensitatea curentului.

● Un **exemplu de multimetru** este voltmetrul electronic universal tip E-0401 produs de I.E.M.I. — București. Acest aparat permite:

— măsurarea tensiunilor continue de la 100 mV la 1 000 V, în 7 game;

— măsurarea tensiunilor alternative de la 100 mV la 300 V, în 6 game, în banda de frecvențe 20 Hz...200 MHz;

— măsurarea rezistențelor de la 2Ω la 1 000 MΩ, în 7 game.

Probleme și întrebări recapitulative

1. Știind că există voltmetre neelectronice mai simple și mai ieftine, de ce se construiesc totuși voltmetrele electronice?
2. La voltmetrele electronice, consumul de putere de la circuitul de măsurat este foarte mic. De unde este luată totuși energia necesară funcționării acestor aparate?
3. Cum se poate obține o rezistență de intrare foarte mare la voltmetrele electronice de c.c.?
4. Care dintre voltmetrele cu diode, studiate, are intrarea blocată?
5. Un voltmetru de valori medii etalonat în valori efective poate măsura tensiuni de formă dreptunghiulară?

CAPITOLUL 8

APARATE DE MĂSURAT DIGITALE

A. GENERALITĂȚI

După modul în care se exprimă rezultatul măsurării, aparatele de măsurat se împart în două mari categorii:

— *aparate de măsurat analogice;*

— *aparate de măsurat digitale.*

● **Aparatele de măsurat analogice** se caracterizează prin faptul că:

— mărimea perceptibilă de la ieșirea lor (indicația) variază continuu în funcție de mărimea de măsurat (de exemplu, deplasarea unui indicator în fața unei scări gradate);

— măsurarea este continuă (fără întreruperi);

— rezultatul măsurării poate lua orice valoare (indicatorul poate ocupa orice poziție în fața scării gradate).

● **Aparatele de măsurat digitale** se caracterizează prin faptul că:

— rezultatul măsurării este afișat direct sub formă numerică;

— măsurarea nu este continuă, ci discretă, efectuîndu-se la anumite intervale de timp;

— rezultatul măsurării nu poate lua orice valoare, deoarece indicația variază în trepte (între două valori succesive indicate de un aparat de măsurat numeric mai pot exista și alte valori pe care aparatul nu le poate indica; de exemplu, între indicațiile 35,725 și 35,726 mai pot exista și alte valori ca: 35,7251, 35,7257,...).

Aparatele de măsurat digitale au apărut și s-au dezvoltat odată cu dezvoltarea tehnicii de calcul și a dispozitivelor de automatizare. Folosind cele mai noi cuceriri ale tehnicii moderne, aceste aparate au atins în prezent performanțe deosebit de înalte și sînt în continuă perfecționare. În același timp, tehnica modernă se dezvoltă și se perfecționează folosind din ce în ce mai mult aparatură de măsurat și control digitală.

1. PROPRIETĂȚI

Aparatele de măsurat digitale prezintă o serie de calități care au determinat utilizarea lor din ce în ce mai largă în toate domeniile. Aceste proprietăți sînt:

— eliminarea erorilor de citire (erori de scară, erori subiective introduse de operator, erori de calibrare sau de paralaxă);

— precizie foarte bună, dependentă de numărul cifrelor afișate. Cu cît un aparat afișează mai multe cifre, cu atît precizia lui este mai bună. Se întîlnesc frecvent precizii de 10^{-5}—10^{-6};

— sensibilitatea foarte bună; creșterea sensibilității este posibilă datorită *rezoluției* aparatului (rezoluția este cea mai mică variație a mărimii de măsurat pe care o poate sesiza un aparat de măsurat digital și corespunde intervalului dintre două indicații succesive);

— siguranță mare în exploatare;

— rapiditate și comoditate în efectuarea măsurărilor;

— viteză de măsurare mare, putînd realiza cîteva sute de măsurări pe secundă. Această proprietate permite ca un singur aparat să fie cuplat succesiv, prin intermediul unor selectoare, în mai multe puncte de măsurare ale unei instalații;

— posibilitatea înregistrării rapide și precise a rezultatelor;

— posibilitatea programării și automatizării procesului de măsurare;

— posibilitatea cuplării cu calculatoare sau alte dispozitive automate;

— posibilitatea transmiterii rezultatelor la distanță, fără introducerea unor erori suplimentare.

● Față de aparatele analogice, aparatele de măsurat digitale prezintă și unele **dezavantaje**, cum ar fi:

— complexitate mare;

— cost ridicat.

2. UTILIZĂRI

Datorită performanțelor lor, aparatele de măsurat digitale sînt utilizate la:

— măsurări de precizie în laboratoare;

— măsurări în procesele industriale automatizate;

— măsurări cu transmiterea rezultatelor la distanță;

— măsurări cu prelucrarea rezultatelor pe calculator;

— măsurări cu înregistrări numerice în procesele industriale;

— controlul și supravegherea centralizată în procesele industriale.

Opțiunea între aparatele de măsurat analogice și cele digitale se face în funcție de complexitatea procesului de măsurare; pentru procese simple, locale, cu număr redus de mărimi de măsurat și precizii reduse se aleg aparate analogice; pentru procese complexe, cu număr mare de mărimi de măsurat și precizii ridicate se aleg aparate digitale.

3. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Principiul de funcționare al aparatelor de măsurat digitale constă în transformarea mărimii de măsurat, de obicei analogice, în semnale digitale, care se prelucrează cu circuite specifice, și afișarea rezultatului sub formă numerică.

Transformarea mărimilor analogice, cu variație continuă, în semnale digitale se realizează cu ajutorul convertoarelor analog-digitale. Acestea sînt niște circuite care discretizează și codifică mărimea de măsurat.

● **Discretizarea** se face atît în timp, cît și în nivel.

Discretizarea în timp constă în eșantionarea mărimii de măsurat, măsurarea efectuîndu-se numai la anumite intervale de timp.

Discretizarea în nivel, sau *cuantificarea*, constă în transformarea variației continue a mărimii de măsurat într-o variație în trepte, care reproduce cu o anumită aproximație variația continuă (fig. 8.1). Aproximația este cu atît mai bună cu cît treapta de variație este mai mică și deci numărul de trepte — mai mare. În urma discretizării în nivel, mărimea de măsurat poate căpăta numai un număr limitat de valori distincte. În fiecare moment de măsurare, mărimea care se măsoară este aproximată cu valoarea celei mai apropiate trepte. De exemplu, pe diagrama din figura 8.1, la momentul t_2, mărimea A_2 este aproximată cu treapta a_3, la momentul t_4 mărimea A_4 — cu treapta a_5, iar la momentul t_6 mărimea A_6 — cu treapta a_7. Datorită acestei aproximații, există o diferență între valoarea mărimii și valoarea măsurată,

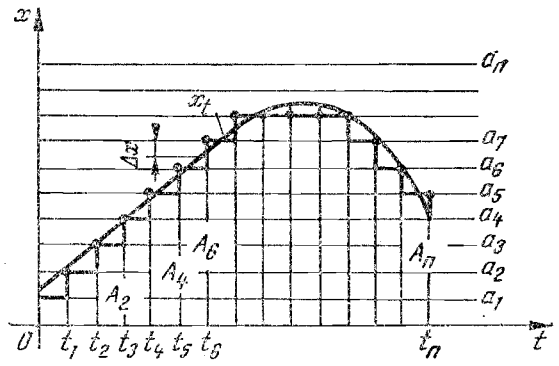


Fig. 8.1. Discretizarea mărimii continue, în timp și în nivel.

care constituie *eroarea de discretizare*. Această eroare nu depășește însă diferența între două trepte succesive, care reprezintă rezoluția aparatului.

Intervalul de eșantionare (timpul dintre două măsurări succesive) și treapta de nivel se aleg în funcție de cadența de măsurare dorită (numărul de măsurări pe secundă) și de eroarea maximă admisă.

● Prin **codare** se atribuie o valoare numerică treptei corespunzătoare mărimii măsurate și se exprimă această valoare într-un anumit sistem de numerație.

4. METODE DE MĂSURARE

Funcționarea și construcția aparatelor de măsurat digitale se bazează pe trei metode de măsurare: *măsurarea directă, măsurarea prin compensare* și *măsurarea mixtă*.

● **Măsurarea directă** constă în *convertirea mărimii de măsurat direct într-un număr de impulsuri proporțional cu valoarea sa, care prin codare este evaluată numeric și afișată*. Măsurarea directă se folosește pentru măsurarea numerică a timpului și frecvenței, care prin natura lor se pretează măsurării numerice. Măsurarea directă a altor mărimi analogice (tensiune, intensitate a curentului, rezistență electrică, temperatură etc.) se face transformînd (convertind) aceste mărimi în timp sau frecvență.

● **Măsurarea prin compensare** constă în *compararea mărimii de măsurat cu o mărime de referință de aceeași natură, variabilă în trepte sau prin aproximații succesive*. Mărimea de referință este generată în interiorul aparatului de măsurat numeric, de un convertor digital-analog, care înregistrează totodată valoarea mărimii generate. Cînd mărimea de referință devine egală cu mărimea de măsurat, valoarea ei se indică numeric.

● **Măsurarea mixtă** reprezintă o *combinație între măsurarea prin compensare și cea directă*, care asigură o viteză mare de măsurare și în același timp o sensibilitate și o precizie ridicată.

B. PĂRȚILE COMPONENTE ALE APARATELOR DE MĂSURAT DIGITALE

Deși sînt de o mare diversitate, aparatele de măsurat numerice sînt alcătuite dintr-o serie de blocuri funcționale comune, conectate între ele după o schemă bloc ca cea reprezentată în figura 8.2. Aceste blocuri

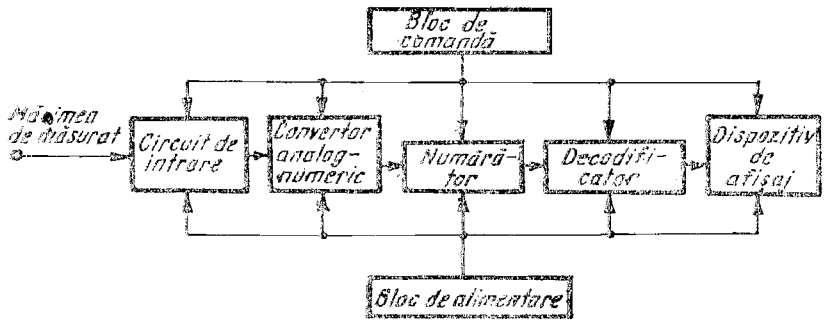


Fig. 8.2. Schema bloc a aparatelor de măsurat numerice.

funcționale sînt: *circuitul de intrare, convertorul analog-numeric, numărătorul, decodorul, dispozitivul de afișare, blocul de comandă* și *blocul de alimentare*.

● **Circuitul de intrare** prelucrează mărimea de măsurat pentru a obține o mărime convenabilă la intrarea convertorului. El poate fi un amplificator cînd mărimea de măsurat este prea mică, un atenuator cînd mărimea de măsurat este prea mare, un redresor cînd mărimea de măsurat este alternativă și la intrarea convertorului se cere un semnal continuu etc.

În același timp, circuitul de intrare asigură impedanța necesară la intrarea aparatului de măsurat numeric.

● **Convertorul analog-digital** transformă mărimile de măsurat analogice în mărimi digitale (de obicei — o serie de impulsuri).

● **Numărătorul** numără impulsurile de la ieșirea convertorului, în sistemul de numerație binar sau binar-zecimal.

● **Decodorul** transformă rezultatul măsurării din sistemul binar în sistemul zecimal.

● **Dispozitivul de afișare**, după cum arată și numele său, afișează sub formă numerică rezultatul măsurării.

● **Blocul de comandă** asigură comanda automată a operațiilor.

● **Blocul de alimentare** alimentează toate celelalte blocuri funcționale.

În continuare va fi prezentată funcționarea unora dintre blocurile specifice aparatelor de măsurat numerice. Convertoarele analog-numerice vor fi studiate împreună cu aparatele care le folosesc.

1. NUMĂRĂTOARE

Numărătorul este blocul care *realizează funcția de numărare a impulsurilor*. El este format dintr-un lanț de celule elementare de numărare, care depind de sistemul de numerație folosit.

a. SISTEME DE NUMERAȚIE

Un **sistem de numerație** este *un cod pentru reprezentarea unei cantități*. El se compune dintr-un număr de simboluri (cifre) și un algoritm de combinare a acestor simboluri pentru reprezentarea diferitelor cantități.

Se pot folosi diferite sisteme de numerație, fiecare sistem caracterizîndu-se printr-o anumită bază, n (de exemplu, sistemul de numerație în baza 10, în baza 2, în baza 7 etc.).

● Un **sistem de numerație în baza n** cuprinde n simboluri (cifre) distincte, care reprezintă coeficienți ridicați la puterile succesive ale bazei n. Un număr N va fi codificat într-un sistem cu baza n astfel:

$$N_n = \sum_k C_k \, n^k, \tag{8.1}$$

unde C reprezintă cifrele sistemului cu baza n ($0 \leqslant C \leqslant n-1$), iar k reprezintă rangul termenului respectiv ($-\infty < k < +\infty$).

● **Sistemul zecimal.** În viața de toate zilele, oamenii folosesc sistemul de numerație zecimal. Se presupune că el a fost adoptat încă din vechime, datorită faptului că omul are zece degete care i-au servit inițial la numărare.

În sistemul zecimal $n = 10$, deci există zece cifre distincte (0, 1, 2,3,4,5,6,7,8,9), care multiplică puterile succesive ale lui 10. Un număr N reprezentat în sistemul zecimal va fi:

$$N_{10} = \sum_k C_k \, 10^k, \tag{8.2}$$

unde $0 \leq C \leq 9$, iar $-\infty < k < +\infty$.

De exemplu: $(1353{,}23)_{10} = 1.10^3 + 3.10^2 + 5.10^1 + 3.10^0 + 2.10^{-1} + 3.10^{-2}$.

Pentru simplificarea scrierii, se omit puterile bazei și semnele de adunare, numărul reprezentîndu-se prin cifrele respective așezate în ordinea corespunzătoare rangului. Virgula indică limita dintre coeficienții puterilor pozitive (inclusiv zero) și cei ai puterilor negative ale bazei.

● **Sistemul binar.** În construcția aparatelor de măsurat numerice și în tehnica modernă de calcul, se folosește sistemul de numerație binar (cu baza 2), deoarece necesită numai două simboluri distincte, care pot fi ușor redate cu circuitele electrice sau electronice, ce conțin elemente (relee, diode, tranzistoare) cu două stări distincte (închis-deschis, conduce-nu conduce, nivel ridicat-nivel coborît).

Sistemul binar are numai două cifre, 0 și 1. Cifrele 1 se numește *bit*, care provine de la „binary digit" (în limba engleză aceasta înseamnă cifră binară).

Un număr în sistemul binar este reprezentat de suma puterilor succesive ale lui 2, multiplicate cu coeficienții 0 sau 1. De exemplu:

$$(57)_{10} = 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = (111001)_2$$

Ca și în sistemul zecimal, și în sistemul binar numerele se reprezintă numai prin cifrele 0 și 1, puterile bazei și semnul + omițîndu-se.

În tabelul 8.1 se dă corespondența dintre numerele 0...10 scrise în sistemul zecimal și în sistem binar.

TABELUL 8.1

Număr? zecimal	0	1	1	2	3	4	5	6	7	9	10
Număr? binar	0	1	10	11	100	101	110	111	1 000	1 001	1 010

● **Sistemul binar-zecimal.** Deși sistemul de numerație binar este foarte potrivit pentru prelucrarea semnalelor cu circuite electrice și electronice, afișarea rezultatelor în acest sistem ar fi foarte greu de interpretat de oameni, care sînt obișnuiți să gîndească și să lucreze în sistemul zecimal (să ne imaginăm că am spune 111001 în loc de 57!).

Pentru a simplifica citirea și operarea cu numere binare, au fost concepute coduri binare speciale, care să permită pe de o parte prelucrarea semnalelor în sistemul binar și, pe de altă parte, reprezentarea rezultatelor în sistemul zecimal.

Un astfel de cod, utilizat frecvent în aparatele de măsurat numerice, este codul binar-zecimal, cunoscut și sub numele de BCD (binary coded-decimal), care îmbină caracteristicile celor două sisteme.

În codul binar-zecimal numerele se reprezintă în succesiunea din sistemul zecimal, dar fiecare cifră a numărului din baza 10 se exprimă printr-un număr binar. Fiecare cifră a sistemului zecimal se exprimă prin patru cifre binare, al căror ansamblu se numește *tetradă*.

De obicei, ponderile fiecărei cifre binare din tetradă, de la stînga la dreapta, corespund puterilor 2^3, 2^2, 2^1, 2^0, adică 8-4-2-1. Acest cod este denumit codul BCD natural, NBCD, sau codul 8421.

De exemplu, numărul zecimal 4 935 în NBCD va fi:

0100	1001	0011	0101
4	9	3	5

În tabelul 8.2 este dată reprezentarea cifrelor zecimale prin tetrade în codul binar-zecimal 8421.

TABELUL 8.2

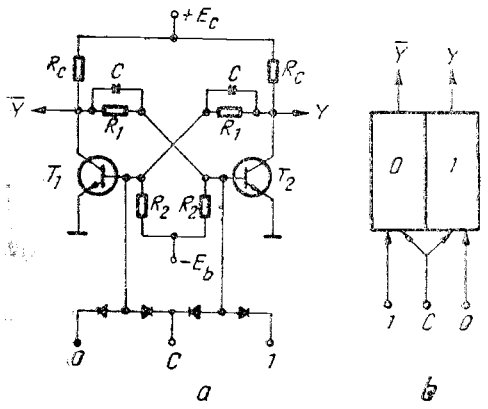
Cifră zecimală	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cod binar-zecimal	0 000	0 001	0 010	0 011	0 100	0 101	0 110	0 111	1 000	1 001

În afara acestui cod mai există și alte coduri binar-zecimale, cu alte ponderi, de exemplu 2421, sau 4421, care însă se utilizează mai rar

b. CIRCUITUL BASCULANT BISTABIL

Celula elementară de numărare în sistemul binar este un circuit basculant bistabil.

Circuitul basculant bistabil este un dispozitiv electronic, care se caracterizează prin două stări distincte, ambele stabile. El este folosit *ca element de comutație*, putînd trece brusc dintr-o stare în alta în urma aplicării unei comenzi din exterior, și *ca element de memorie*, putînd rămîne oricît într-o anumită stare, dacă nu se aplică nici o comandă externă.



a

b

Fig. 8.3. Circuit basculant bistabil.

● În figura 8.3, *a* este prezentată **schema unui circuit basculant bistabil**, realizat cu tranzistoare *npn*, iar în figura 8.3, *b* este dată reprezentarea sa convențională.

După cum se vede în figura 8.3, *a*, circuitul basculant bistabil este alcătuit din două etaje de amplificare, realizate cu cîte un tranzistor. Ieșirea fiecărui etaj de amplificare este conectată direct la intrarea celuilalt etaj prin rezistențele R_1. În acest fel, fiecare etaj de amplificare constituie o buclă de reacție pentru celălalt (semnalul de la ieșirea tranzistorului T_1 este amplificat de tranzistorul T_2 și readus la intrarea lui T_1; la fel pentru T_2). Datorită acestor reacții, cele două tranzistoare nu pot conduce simultan. Cînd un tranzistor conduce, celălalt este blocat, și invers. Circuitul prezintă deci două stări stabile: starea 1, în care tranzistorul T_1 conduce și T_2 este blocat, și starea 0, în care T_2 conduce și T_1 este blocat.

Din colectoarele celor două tranzistoare se obțin două semnale: Y la ieșirea tranzistorului T_2 și $\overline{Y}$ (Y negat) la ieșirea tranzistorului T_1.

● **Funcționare.** *În starea stabilă*, tranzistorul care este blocat are potențialul colectorului egal cu $+E_c$, iar tranzistorul care conduce, funcționînd la saturație, are tensiunea pe colectorul său aproape nulă.

Comanda de basculare se realizează prin aplicarea unui impuls negativ la intrare. Circuitul basculant bistabil reprezentat în figura 8.3 are trei intrări. O intrare C simetrică, la care fiecare impuls determină basculiarea dintr-o stare în alta. Această intrare este folosită pentru numărarea impulsurilor. Intrările 0 și 1 sînt nesimetrice. Prin aplicarea unui impuls negativ de comandă la una dintre aceste intrări, basculiarea nu se poate face decît într-un singur sens. De exemplu: dacă se aplică un impuls negativ la intrarea *1*, bistabilul basculează în starea 1 și rămîne în această stare; pentru ca bistabilul să basculeze în starea 0, trebuie să se aplice un impuls negativ la intrarea 0. Intrările nesimetrice sînt folosite pentru aducerea bistabilului în starea 0 sau în starea 1, indiferent de starea pe care a avut-o înainte.

c. NUMĂRĂTOR BINAR

După cum s-a mai arătat, celula elementară de numărare în sistemul binar este circuitul bistabil.

Un circuit bistabil (o celulă binară), avînd doar două stări distincte, nu poate număra decît un singur impuls, deoarece la al doilea trece din nou în zero.

Dacă se cuplează în cascadă două circuite bistabile, se realizează un sistem care are patru stări distincte și poate număra pînă la trei.

Pentru explicarea funcționării numărătoarelor, se consideră că bistabilul este comandat simetric cu impulsuri negative și că starea 1 corespunde situației cînd tranzistorul T_1 din stînga conduce și la ieșirea Y apare o tensiune pozitivă, iar starea 0 corespunde situației cînd tranzistorul T_2 din dreapta conduce și la ieșirea Y tensiunea este aproximativ zero.

● **Sistem de numărare cu două celule binare în cascadă.** *Inițial*, cele două celule binare sînt în starea 0. *La aplicarea primului impuls*, celula B_1 trece din starea 0 în starea 1. La ieșirea sa apare un salt de tensiune pozitiv, care nu afectează celula B_2, sensibilă doar la impulsuri negative datorită diodei din circuitul de intrare. *La aplicarea celui de-al doilea impuls*, celula B_1 trece din starea 1 în starea 0, iar tensiunea la ieșirea sa face un salt negativ ce se transmite celulei B_2. Aceasta basculează din starea 0 în starea 1. *La aplicarea celui de-al treilea impuls*, celula B_1 trece din nou în starea 1, producînd un salt de tensiune pozitiv la ieșire, care nu afectează celula B_2. *La al patrulea impuls*, B_1 revine în starea 0, la ieșirea sa, Y, apare din nou un salt negativ de tensiune, care face ca celula B_2 să basculeze din starea 1 în starea 0, sistemul revenind astfel în starea inițială.

Se observă că sistemul de numărare cu două celule binare în cascadă poate pune în evidență $2^2 = 4$ stări distincte și poate număra trei impulsuri. La al patrulea impuls, sistemul revine în starea inițială.

● Prin **legarea în cascadă a mai multor celule binare** se obține un **bloc de numărare**. Dacă numărătorul are n celule în cascadă, poate pune în evidență 2^n stări distincte și poate număra pînă la 2^n-1 impulsuri.

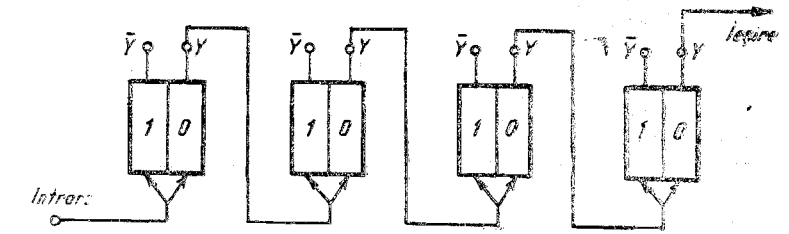
Regula generală de funcționare a unui sistem de celule binare în cascadă este următoarea: prima celulă își schimbă starea la fiecare impuls aplicat la intrare; fiecare dintre celelalte celule din lanț își schimbă starea numai cînd bistabilul precedent trece din starea 1 în starea 0.

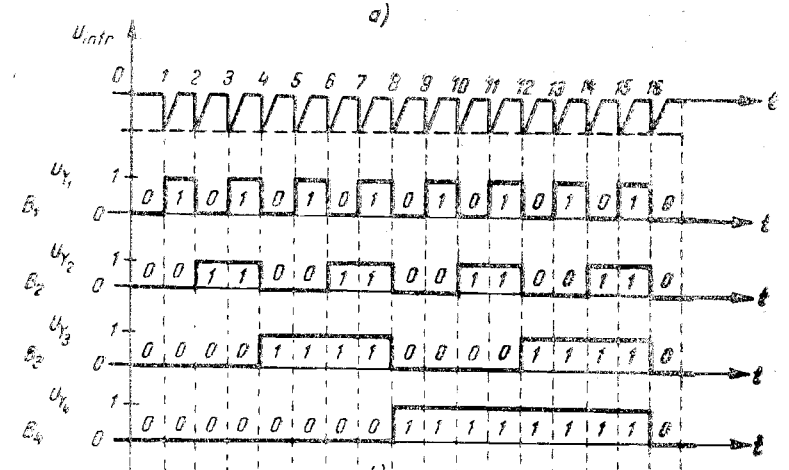
Aplicînd această regulă, se observă că prima celulă a unui numărător binar își schimbă starea la fiecare impuls aplicat la intrare, cea de-a doua își schimbă starea din două în două impulsuri, cea de-a treia din patru în patru, cea de-a patra din opt în opt ș.a.m.d. Celulele corespund deci puterilor succesive ale lui 2, iar stările lor corespund coeficienților acestor puteri; aceasta explică funcționarea sistemului ca numărător binar.

În figura 8.4, *a* este prezentat un *numărător binar cu patru celule*, care poate pune în evidență $2^4 = 16$ stări distincte și poate număra pînă la 15 impulsuri. Variația tensiunilor la ieșirile Y ale celulelor binare în funcție de impulsurile aplicate la intrare este prezentată în figura 8.4, *b*, iar în figura 8.4, *c* este dată variația stărilor celulelor.

d. NUMĂRĂTOR DECADIC

Pentru a realiza o numărare în sistemul de numerație zecimal, este necesar un numărător cu zece stări distincte. Cele zece stări distincte se pot realiza cu celule binare, dar după cum s-a văzut un numărător binar revine în starea inițială după un număr de impulsuri corespunzînd puterilor numărului 2.





c)

Numărul impulsului	Numărul binar	B_4	B_3	B_2	B_1
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1
2	10	0	0	1	0
3	11	0	0	1	1
4	100	0	1	0	0
5	101	0	1	0	1
6	110	0	1	1	0
7	111	0	1	1	1
8	1000	1	0	0	0
9	1001	1	0	0	1
10	1010	1	0	1	0
11	1011	1	0	1	1
12	1100	1	1	0	0
13	1101	1	1	0	1
14	1110	1	1	1	0
15	1111	1	1	1	1
16	0	0	0	0	0

Stările celulelor binare

Fig. 8.4. Numărător binar cu patru celule.

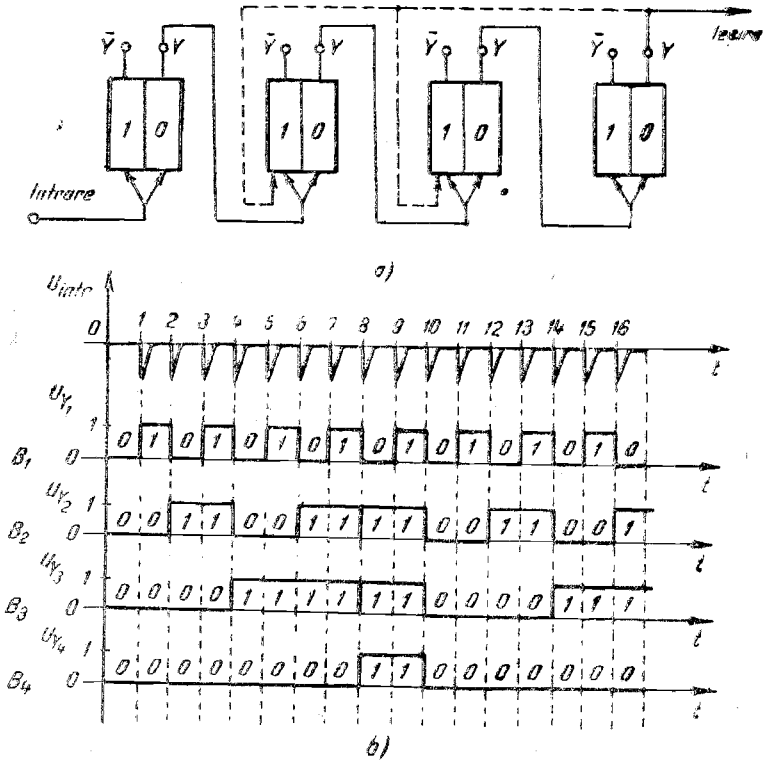


Fig. 8.5. Numărător decadic cu patru celule binare.

● Pentru **obținerea unui numărător cu zece stări stabile**, se poate transforma un numărător binar cu patru celule, suprimînd șase dintre cele 16 stări posibile, prin introducerea unor reacții. Se pot face diverse legături de reacție; în figura 8.5, *a* este prezentată schema unui numărător decadic cu legături de reacție între ieșirea $\overline{Y}$ a celulei B_4 și intrările de comandă nesimetrică 1 ale celulelor B_2 și B_3.

Funcționarea acestui numărător este identică cu a unui numărător binar pînă la impulsul 7, cînd starea este 0111. La aplicarea celui de-al optulea impuls, mai întîi sistemul trece în starea 1 000, care însă nu se menține, deoarece bascularea celulei B_4 în starea 1 determină un impuls negativ pe ieșirea sa $\overline{Y}$; acesta, transmițîndu-se la celulele B_2 și B_3, determină trecerea lor în starea 1. Starea finală a sistemului este deci 1110; numărătorul indică numărul $(1110)_2 = 14_{10}$

Fig. 8.6. Numărător cu decade în cascadă.

în loc de $(1000)_2 = (8)_{10}$, deci a sărit șase unități. La aplicarea celui de-al nouălea impuls sistemul trece în starea $(1111)_2 = (15)_{10}$, care este și ultima, deoarece la aplicarea celui de-al zecelea impuls sistemul revine în starea zero.

Un astfel de numărător, cu zece stări distincte, numără impulsurile conform codului binar-zecimal, realizînd o tetradă.

● **Legînd în cascadă mai multe numărătoare decadice** se pot obține numărătoare cu decade de ordine crescătoare. Funcționarea acestora decurge în felul următor: la aplicarea celui de-al zecelea impuls la intrare, prima decadă (a unităților) revine la zero prin trecerea ultimei celule binare în starea zero, care totodată furnizează un impuls negativ decadei următoare de numărare. Cea de-a doua decadă corespunde zecilor, deoarece este comandată din zece în zece impulsuri aplicate la intrare; tot așa, la fiecare sută de impulsuri, decada zecilor revine în stare inițială comandînd decada următoare, a sutelor. În figura 8.6 este prezentat un numărător cu decade în cascadă, cu o capacitate de 999 unități.

2. DECODOARE

În aparatele de măsurat numerice, numărătoarele funcționează în sistemul binar dar, pentru a fi ușor interpretate, rezultatele trebuie afișate în sistemul zecimal.

Transformarea unei informații dintr-un sistem de numerație în altul se realizează cu circuite speciale numite decodoare.

Există diverse tipuri de decodoare. Cel mai răspîndit este decodorul din NBCD în zecimal, care va fi analizat în continuare.

DECODORUL DIN NBCD ÎN ZECIMAL

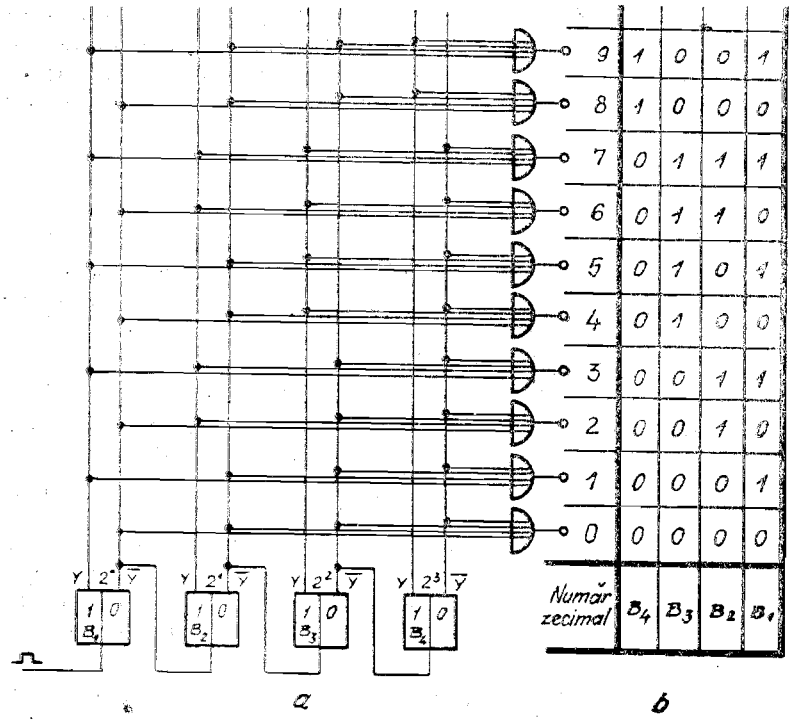
Pentru transformarea unui semnal din sistemul binar-zecimal în sistemul zecimal, este necesar ca *pentru fiecare tetradă să existe un decodor*, care să primească semnalele de la cele patru celule binare ale unei tetrade și să aibă 10 ieșiri corespunzătoare celor 10 cifre ale sistemului zecimal.

Un astfel de decodor se poate realiza cu 10 circuite logice de tip *ȘI*, conectate la cele patru celule binare ale unei tetrade, conform tabelei de adevăr ce leagă între ele cele două sisteme.

Un circuit logic *ȘI* este un circuit care dă semnal la ieșire, numai dacă pe toate intrările sale există semnal.

În figura 8.7, *a* este prezentată **schema logică a unui decodor din sistemul binar sau NBCD** (numerele de la zero la nouă se reprezintă la fel în binar și în NBCD) **în sistemul zecimal,** iar în figura 8.7, *b* este prezentat tabelul de adevăr ce leagă cele două sisteme.

După cum se vede din figura 8.7, *a*, fiecare circuit logic *ȘI* corespunde unei anumite cifre zecimale (0, 1, 2, ... ,9). Cele patru intrări ale fiecărei circuit *ȘI* sînt conectate la cele patru celule binare conform tabelei de adevăr, astfel încît, pentru fiecare număr, numai circuitul *ȘI* corespunzător acelui număr să primească semnal pe toate intrările sale și să dea un semnal de ieșire, în timp ce toate celelalte circuite *ȘI* vor avea cel puțin o intrare fără semnal și, ca urmare, semnalul la ieșirea lor va fi zero.



Număr zecimal	B_4	B_3	B_2	B_1
9	1	0	0	1
8	1	0	0	0
7	0	1	1	1
6	0	1	1	0
5	0	1	0	1
4	0	1	0	0
3	0	0	1	1
2	0	0	1	0
1	0	0	0	1
0	0	0	0	0

Fig. 8.7. Decodificator.

De exemplu, *circuitul ȘI corespunzător cifrei zecimale 4* (în binar 0100) este conectat la ieșirea Y a celulei B_3 și la ieșirile $\overline{Y}$ (ieșirile negate) ale celulelor B_1, B_2 și B_4. În acest fel, cînd numărătorul binar numără 0100, circuitul *ȘI* corespunzător cifrei zecimale 4 primește semnal 1 pe toate intrările sale și va da la ieșire un semnal care poate acționa un dispozitiv de afișare pentru a indica cifra 4. În același timp, toate celelalte circuite *ȘI* vor avea cel puțin o intrare fără semnal și ca urmare nu vor avea semnal de ieșire.

3. DISPOZITIVE DE AFIȘARE

Pentru reprezentarea sub formă numerică a rezultatului măsurării aparatele de măsurat numerice sînt prevăzute cu un dispozitiv de afișare. Acestea sînt comandate de semnalele de la ieșirea decodificatorului.

Există foarte multe tipuri de dispozitive de afișare, dar în construcția aparatelor moderne cel mai frecvent sînt folosite:

— *dispozitivele de afișare cu tuburi cu gaz*, numite și *digitroane* sau *tuburi NIXIE*;

— *dispozitivele de afișare cu diode semiconductoare electroluminescente* (LED);

— *dispozitivele de afișare cu cristale lichide.*

a. DISPOZITIVE DE AFIȘARE CU TUBURI NIXIE

● **Construcția.** Tuburile NIXIE sînt tuburi cu gaz, care au 10 catozi și un anod. Catozii sînt confecționați din sîrmă subțire din crom-nichel și au forma cifrelor de la 0 la 9. Cînd tensiunea dintre anod și unul dintre catozi este egală cu tensiunea de aprindere, gazul din jurul catodului respectiv se ionizează și se amorsează o descărcare luminescentă a cărei culoare depinde de natura gazului (roșie, pentru tuburile cu neon). Lățimea de luminescență a catodului fiind mai mare decît grosimea sîrmei din care acesta este confecționat, cei 10 catozi pot fi așezați unul în fața celuilalt.

● **Schema de comandă a unui tub NIXIE** este reprezentată în figura 8.8. Fiecare catod al tubului NIXIE este conectat în colectorul unuia dintre tranzistoarele $T_0 \ldots T_9$, iar bazele acestor tranzistoare sînt conectate la cele 10 ieșiri ale unui decodificator binar-zecimal.

Cînd un tranzistor conduce la saturație, colectorul său se găsește aproximativ la potențialul zero, iar tensiunea dintre catodul tubului NIXIE conectat în colectorul său și anod este E_a. Această tensiune este mai mică decît tensiunea de aprindere și descărcarea nu se amorsează.

Pentru afișarea unei anumite cifre zecimale, tranzistorul legat la ieșirea corespunzătoare a decodificatorului primește un semnal pozi-

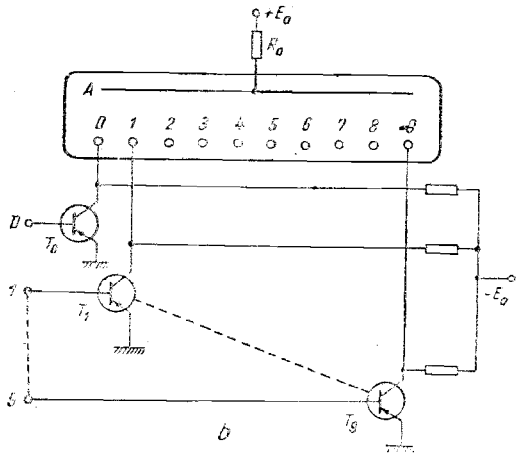


Fig. 8.8. Schema de comandă a unui tub NIXIE.

tiv pe bază și se blochează, În acest caz, pe rezistența din colectorul său nu cade nici o tensiune, deci colectorul se află la potențialul $-E_c$. Între catodul legat în colectorul tranzistorului respectiv și anod, diferența de potențial devine $E_a + E_c$ și este suficientă pentru ca descărcarea în gaz să se amorseze. Ca urmare, gazul din jurul catodului respectiv devine luminescent, indicînd cifra dorită.

Tuburile NIXIE au dezavantajul că necesită tensiuni de aprindere mari, de circa 170 V; de aceea, ele sînt utilizate în special în aparatele echipate cu tuburi electronice. În aparatele tranzistorizate sînt folosite mai rar, în aceste aparate fiind preferate alte tipuri de indicatoare.

b. DISPOZITIVE DE AFIȘARE CU DIODE ELECTROLUMINESCENTE

Diodele electroluminescente, cunoscute și sub denumirea de LED (light emitting diodes), sînt diode semiconductoare care au proprietatea de a emite lumină cînd sînt în stare de conducție. În funcție de semiconductorul folosit, lumina emisă poate avea diferite culori (roșu, verde).

Pentru a indica cele zece cifre zecimale, se folosesc *grupuri de diode care se selectează cu ajutorul unor circuite logice* (codificatoare) *pentru a forma cifra dorită*. Cel mai frecvent se folosesc grupuri de șapte diode astfel așezate încît atunci cînd toate sînt în stare de conducție, să se afișeze cifra 8 (fig. 8.9). Pentru afișarea altor cifre, o parte dintre diode rămîn blocate.

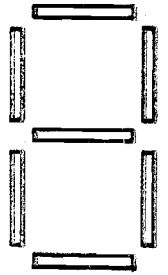


Fig. 8.9. Dispozitiv de afișare cu șapte LED-uri.

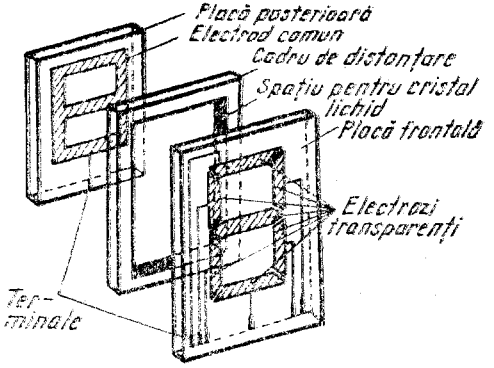


Fig. 8.10. Dispozitiv de afișare cu cristale lichide, cu șapte segmente.

De exemplu, cînd se afișează cifra 0, dioda din mijloc este blocată.

Dispozitivele de afișare cu diode electroluminescente sînt larg răspîndite în aparatele tranzistorizate, deoarece ele funcționează cu tensiuni foarte mici, de ordinul voltilor.

c. DISPOZITIVE DE AFIȘARE CU CRISTALE LICHIDE

● **Cristalele lichide** sînt substanțe aflate într-o stare intermediară, între solid și lichid. Ele curg, dar în același timp moleculele lor sînt orientate într-o anumită ordine, ceea ce dă substanței respective proprietatea de cristal. Ordinea moleculară a cristalelor lichide poate fi influențată de cîmpurile electrice sau magnetice, sub acțiunea cărora substanțele respective își schimbă transparența sau culoarea. Aceste proprietăți ale cristalelor lichide își găsesc foarte multe aplicații în practică.

Deși utilizările practice ale cristalelor lichide au început abia prin anul 1970, în prezent ele sînt frecvent folosite în dispozitivele de afișare ale ceasurilor electronice, ale calculatoarelor și ale aparatelor de măsurat numerice.

Dispozitivele de afișare cu cristale lichide sînt realizate de obicei pe principiul segmentelor luminoase, cu ajutorul cărora se pot forma cifrele de la 0 la 9.

● **Un exemplu de indicator cu cristale lichide** cu șapte segmente luminoase este prezentat în figura 8.10. Dispozitivul este format din două plăci de sticlă, cu rol de suporți, pe care se depun electrozi peli-

culari transparenți; între plăci se introduce un strat subțire de cristal lichid, cu grosimea între 6 m și 25 m. Placa suport frontală are electrozii sub forma a șapte segmente cu terminale individuale amplasate pe o margine a plăcii. Placa suport posterioară are un singur electrod, al cărui contur corespunde cu figura formată de cele șapte segmente. Cînd se aplică o diferență de potențial între electrodul de pe placa posterioară și toți cei șapte electrozi de pe placa frontală, se afișează cifra 8. Pentru afișarea altei cifre, unii dintre electrozii de pe placa frontală nu primesc tensiuni.

● **Caracteristici.** Dispozitivele de afișare cu cristale lichide necesită tensiuni relativ mici și au un consum de energie foarte redus, motiv pentru care ele capătă o răspîndire din ce în ce mai largă.

C. TIPURI DE APARATE DE MĂSURAT DIGITALE

1. NUMĂRĂTORUL UNIVERSAL

Numărătorul universal este din punct de vedere cronologic primul aparat de măsurat digital. După cum îi spune și numele, acest aparat este destinat să numere o serie de impulsuri. El are însă o utilizare foarte largă. În afară de numărare de impulsuri, el poate fi folosit la măsurarea frecvențelor, a perioadelor, a intervalelor de timp sau a raportului între două frecvențe.

Prin utilizarea anumitor traductoare, numărătorul universal poate măsura viteze, turații, timpi de atragere la relee, grosimea laminatelor sau poate face numărări cu preselecție (la ambalări, dozări etc.).

● **Schema bloc a unui numărător universal** este prezentată în figura 8.11 și conține următoarele circuite principale: *oscilatorul cu cuarț, divizorul de frecvență, circuitul de intrare, circuitul poartă, numărătorul, decodificatorul* și *dispozitivul de afișare.*

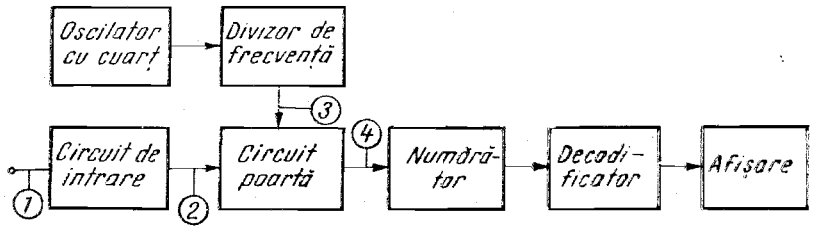


Fig. 8.11. Schema bloc a unui numărător universal.

● **Principiul de funcționare a numărătorului universal** constă în numărarea unor impulsuri într-un timp determinat. În acest scop, el conține un circuit poartă, la intrarea căruia se aplică impulsurile de numărat împreună cu un semnal de comandă care determină durata numărării. Circuitul poartă este de obicei un circuit de tip *ȘI*. La ieșirea porții se vor regăsi impulsurile aplicate la intrare, numai pe durata coincidenței dintre cele două semnale. Impulsurile de la ieșirea porții sînt numărate de numărător în sistemul binar sau binar codificat în zecimal (BCD). Decodificatorul transformă rezultatul numărării din binar sau din BCD în sistemul zecimal, pentru a fi apoi afișat numeric de dispozitivul de afișare.

Funcționarea numărătorului universal este comandată de un oscilator cu cuarț, de mare sensibilitate. Deoarece oscilatorul cu cuarț funcționează pe o frecvență fixă, pentru obținerea unor semnale de frecvență diferite se folosește un divizor de frecvență, care împarte prin decade succesive $\left(1, \frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \ldots\right)$ frecvența semnalelor date de oscilatorul cu cuarț. Semnalele obținute la ieșirea divizorului de frecvență se aplică la una dintre intrările circuitului poartă, determinînd în acest mod, cu precizie foarte mare, durata unuia dintre semnalele ce se aplică porții. Oscilatorul cu cuarț împreună cu divizorul de frecvență alcătuiesc baza de timp a numărătorului universal.

Circuitul de intrare prelucrează semnalele aplicate la intrare, pentru a fi compatibile cu intrarea părții logice a numărătorului (intrarea circuitului poartă). Deoarece la intrarea porții trebuie să se aplice semnale sub forma unor impulsuri de o anumită amplitudine, circuitul de intrare are rolul de a transforma semnalele aplicate la intrare, care pot avea amplitudini și forme diferite, în impulsuri de aceeași frecvență.

2. FRECVENȚMETRE ȘI CRONOMETRE DIGITALE

După cum s-a arătat în paragraful precedent, numărătorul universal poate fi fi folosit la măsurarea intervalelor de timp și a frecvențelor. Aceste mărimi se pot măsura numeric prin metode directe. În cazul măsurării frecvențelor, se numără perioadele semnalului a cărui frecvență se măsoară, într-un interval de timp prestabilit, de exemplu o secundă. La măsurarea intervalelor de timp, se numără impulsurile date de generatorul bază de timp, în intervalul de timp ce se măsoară. Deci, și într-un caz și în celălalt, *măsurarea constă în numărarea unor impulsuri*, numărare ce se poate realiza cu numărătorul universal.

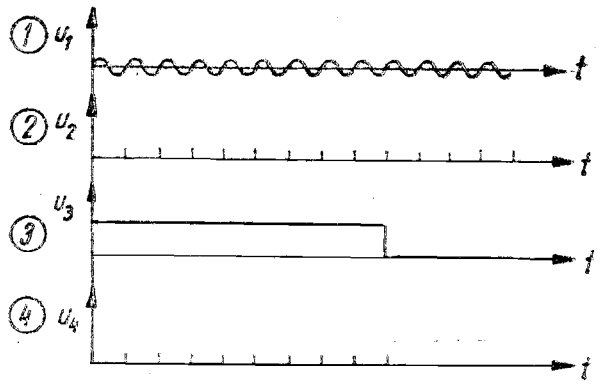


Fig. 8.12. Măsurarea numerică a frecvenței.

Frecvențmetrele și cronometrele numerice moderne sînt construite sub forma unui numărător universal, adaptat pentru una dintre cele două funcționări.

● Pentru **funcționarea ca frecvențmetru**, semnalul a cărui frecvență se măsoară se aplică circuitului de intrare, care îl transformă în impulsuri avînd aceeași frecvență. Aceste impulsuri se aplică pe pe una dintre intrările circuitului poartă. La cea de-a doua intrare a porții, se aplică semnalul de la divizorul de frecvență, semnal ce are o durată bine determinată, de exemplu o secundă. Pe durata cît cele două semnale coincid, impulsurile trec prin poartă spre numărător. Acesta le numără, iar rezultatul numărării este decodificat și afișat numeric.

În figura 8.12 s-au reprezentat diagramele semnalelor în diferite puncte ale frecvențmetrului (*1* — semnalul la intrare; *2* — semnalul la ieșirea circuitului de intrare; *3* — semnalul dat de divizorul de frecvență; *4* — semnalul la ieșirea circuitului poartă, respectiv la intrarea numărătorului).

● **Cronometrele** sînt aparate destinate să măsoare intervalele de timp. Un cronometru numeric este realizat cu un numărător universal.

La una dintre intrările circuitului poartă se aplică impulsuri generate de baza de timp, care au o anumită perioadă T_0. La cea de-a doua intrare se aplică un semnal generat de circuitul de intrare, care are durata egală cu intervalul de timp ce se măsoară. De exemplu, la cronometrarea unei curse sportive, în momentul în care se dă startul, circuitul de intrare primește o comandă de pornire și produce un semnal care deschide circuitul poartă. În momentul cînd se trece linia

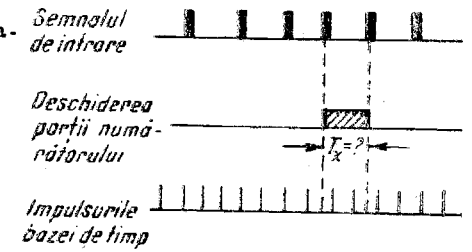


Fig. 8.13. Măsurarea numerică a intervalelor de timp.

de sosire, circuitul de intrare primește un nou semnal, de oprire. Din momentul respectiv circuitul poartă se blochează.

Atît timp cît poarta este deschisă, trec spre numărător impulsurile generate de baza de timp. Aceste impulsuri se numără, se multiplică cu perioada T_0 a bazei de timp, iar rezultatul se decodifică și se afișează sub formă numerică.

În figura 8.13 s-au reprezentat diagramele semnalelor în diferite puncte ale unui cronometru.

§ 3. VOLTMETRE DIGITALE

Voltmetrele digitale sînt aparate utilizate la măsurarea tensiunilor continue în limitele 1 μV — 1 000 V, la care rezultatul măsurării este afișat sub formă numerică. Ele pot fi utilizate și pentru măsurarea tensiunilor alternative, dacă sînt prevăzute cu circuite speciale de detecție.

Voltmetrele digitale sînt foarte răspîndite și se caracterizează prin:

— precizie foarte bună, ajungînd pînă la 10^{-6};

— impedanță de intrare foarte mare (la unele aparate — zeci de mii de megohmi);

— viteză de măsurare mare, pînă la sute de măsurări pe secundă;

— funcționare automată (schimbarea automată a gamei de măsurare și indicarea polarității tensiunii).

Deoarece tensiunea este o mărime analogică, pentru măsurarea ei numerică este necesar să se folosească convertoare analog-digitale. Convertoarele analog-digitale utilizate în voltmetrele digitale sînt de diferite tipuri, dar funcționarea lor se bazează pe cîteva metode de conversie fundamentale:

— *metoda conversiei intermediare în timp sau frecvență;*
— *metoda compensării;*
— *metode mixte.*

a. VOLTMETRUL DIGITAL CU CONVERTOR TENSIUNE-TIMP

După cum s-a mai arătat, partea principală a unui voltmetru digital o constituie convertorul analog-digital. În cazul unui convertor tensiune-timp, *funcționarea acestuia se bazează pe convertirea tensiunii continue de măsurat într-un interval de timp proporțional cu aceasta, interval de timp ce se măsoară apoi numeric ca la cronometrele digitale.*

● În figura 8.14, *a* este prezentată **schema bloc** a unui voltmetru digital cu convertor tensiune-timp, iar în figura 8.14, *b* sînt prezentate diagramele semnalelor în diferite puncte ale aparatului.

După cum se vede din schema bloc, tensiunea de măsurat U_x se aplică la intrarea unui comparator, care o compară cu o tensiune liniar-variabilă în timp, $U_e = k(t - t_0)$, primită de la un generator etalon.

● **Funcționarea.** *În momentul* $t = t_0$, în care începe o măsurare, tensiunea etalon este zero și se comandă deschiderea circuitului poartă prin care trec spre numărător impulsuri de frecvență f_0 generate de un oscilator cu cuarț.

La $t = t_x$, tensiunea U_e, care crește liniar în timp, devine egală cu tensiunea de măsurat U_x:

$$U_x = U_e = k(t_x - t_0). \tag{8.3}$$

Cînd cele două tensiuni sînt egale, comparatorul comandă închiderea circuitului poartă, deci circuitul poartă rămîne deschis numai în intervalul de timp $t_x - t_0$, care conform relației (8.3) este proporțional cu tensiunea U_x de măsurat. Numărul de impulsuri N care trec prin poartă spre numărător este egal cu produsul dintre frecvența f_0 a oscilatorului cu cuarț și intervalul de timp $t_x - t_0$ cît este deschisă poarta:

$$N = f_0 (t_x - t_0). \tag{8.4}$$

Din relația (8.3) se deduce: $t_x - t_0 = \frac{1}{k} U_x$; înlocuind această expresie în relația (8.4) se obține:

$$N = \frac{f_0}{k} U_x = K U_x. \tag{8.5}$$

Relația (8.5) arată că numărul impulsurilor ce trec prin poartă în intervalul de timp $t_x - t_0$ este proporțional și cu tensiunea de măsurat.

Aceste impulsuri sînt numărate de numărător, iar rezultatul numărării este decodificat și afișat numeric.

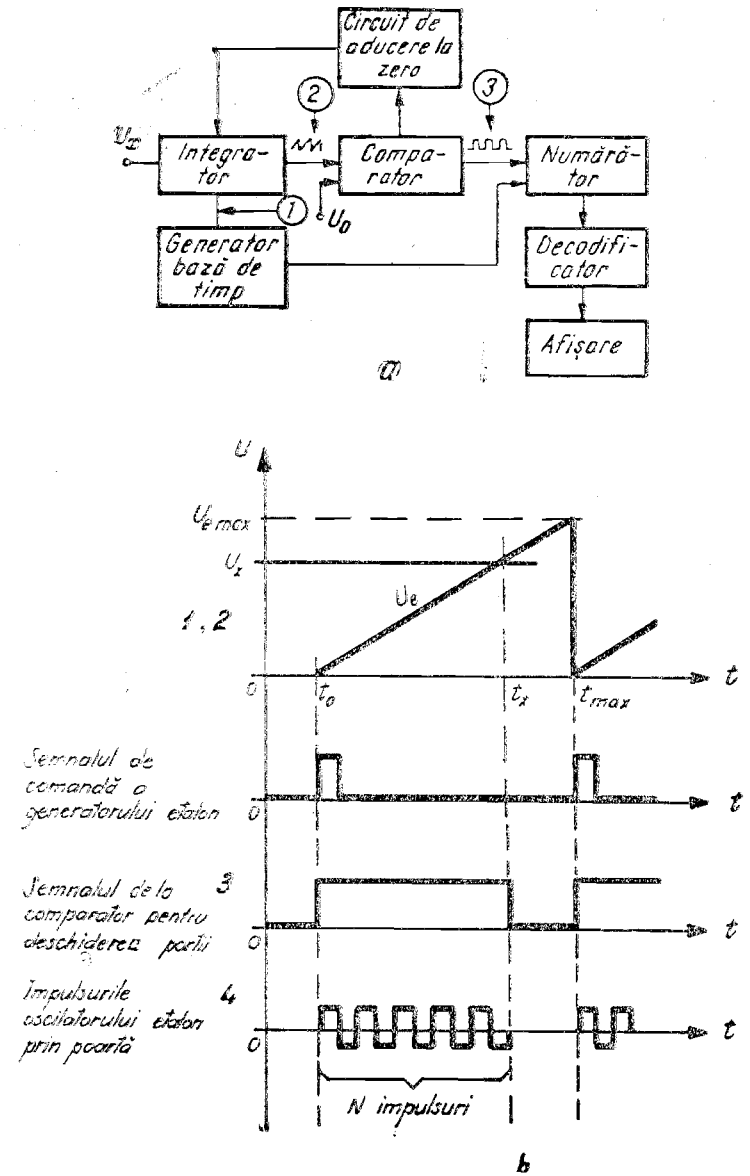


Fig. 8.14. Voltmetrul numeric cu convertor tensiune-timp:
a — schema bloc; *b* — tensiunile în diferite puncte.

b. VOLTMETRUL DIGITAL CU CONVERTOR TENSIUNE-FRECVENȚĂ

Funcționarea convertorului tensiune-frecvență se bazează pe transformarea tensiunii de măsurat într-o serie de impulsuri a căror frecvență este proporțională cu tensiunea U_x.

Convertorul tensiune-frecvență utilizează un circuit integrator, care asigură încărcarea unui condensator sub curent constant. În acest caz, tensiunea de la ieșirea integratorului crește liniar în timp și este proporțională cu tensiunea aplicată la intrarea sa:

$$U_2 = kU_1 t \tag{8.6}$$

Dacă integrarea durează un interval de timp T:

$$U_2 = kU_1 T = KU_1. \tag{8.7}$$

● Voltmetrele digitale cu convertor tensiune-frecvență sînt realizate după o **schemă bloc** ca cea prezentată în figura 8.15, *a*. În figura 8.15, *b* sînt prezentate diagramele semnalelor în diferite puncte ale aparatului.

● **Funcționarea voltmetrului** este comandată de un generator bază de timp, care determină durata T a unei măsurări.

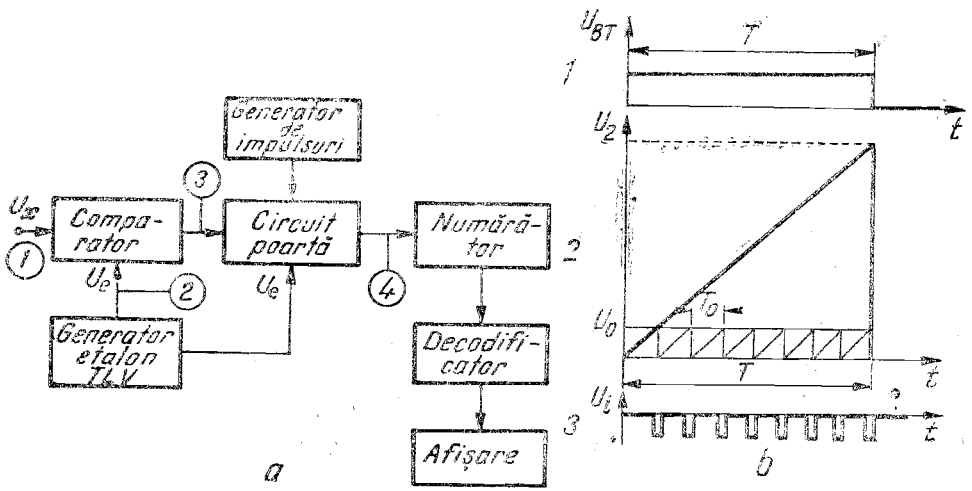


Fig. 8.15. Voltmetru numeric cu convertor tensiune-frecvență:
a — schema bloc; *b* — semnalele în diferite puncte.

Tensiunea de măsurat U_x se aplică la intrare integratorului, care după un interval de timp T ar trebui să dea la ieșire o tensiune:

$$U_2 = kU_x T = KU_x. \tag{8.8}$$

Ieșirea integratorului este însă legată la intrarea unui comparator, care compară tensiunea de la ieșirea integratorului cu o tensiune de referință U_0. În momentul în care tensiunea de la ieșirea integratorului devine egală cu tensiunea de referință U_0, comparatorul generează un impuls, care comandă prin intermediul unui circuit aducerea integratorului la zero. Tensiunea la ieșirea integratorului va crește din nou pînă la valoarea tensiunii de referință U_0, după care integratorul este adus din nou la zero și fenomenul se repetă pe toată durata T a unei măsurări. În acest mod, la ieșirea integratorului se obține o tensiune de forma dinților de ferăstrău, iar la ieșirea comparatorului — un număr de impulsuri N proporțional cu tensiunea de măsurat U_x. Acest lucru se poate demonstra cu ajutorul diagramelor prezentate în figura 8.15, *b*. Astfel, se observă că pe durata T a unei măsurări numărul impulsurilor de la ieșirea comparatorului este $N = \frac{T}{T_0}$, unde T_0 este perioada dinților de ferăstrău. De asemenea, din asemănarea triunghiurilor dreptunghice ce reprezintă variația tensiunii U_2 într-un interval de timp T și variația tensiunii la ieșirea integratorului pe durata T_0 a unui dinte de ferăstrău, se deduce:

$$N = \frac{T}{T_0} = \frac{U_2}{U_0}. \tag{8.9}$$

Înlocuind în această expresie pe U_2 cu valoarea sa determinată de relația (8.8) și ținînd seamă că U_0 are o valoare constantă, se obține:

$$N = \frac{K U_x}{U_0} = K_1 U_x. \tag{8.10}$$

Relația (8.10) arată că numărul impulsurilor de la ieșirea comparatorului este proporțional cu tensiunea de măsurat. Aceste impulsuri sînt aplicate la intrarea unui numărător, care le numără, iar rezultatul numărării este decodificat și afișat numeric. Întrucît fiecărui impuls i se atribuie o anumită valoare a tensiunii, rezultatul poate fi exprimat numeric direct în volți.

O variantă mai perfecționată și mai răspîndită este voltmetrul cu dublă integrare (cu dublă rampă).

c. VOLTMETRE DIGITALE CU CONVERTOR ANALOG-DIGITAL CU COMPENSARE, CU TENSIUNI CRESCĂTOARE ÎN TREPTE

Metodele de măsurare cu compensare se bazează pe compararea tensiunii de măsurat cu o tensiune de referință variabilă generată în interiorul aparatului de măsurat digital de un convertor digital-analog. Acesta primește de la un bloc numeric o serie de impulsuri și dă la ieșire o tensiune ce variază în funcție de numărul impulsurilor primite.

Tensiunea generată de convertorul digital-analog poate să varieze în trepte sau prin aproximații succesive.

● **Schema bloc** a unui voltmetru numeric cu convertor analog-numeric cu tensiune crescătoare în trepte este prezentată în figura 8.16, *a*.

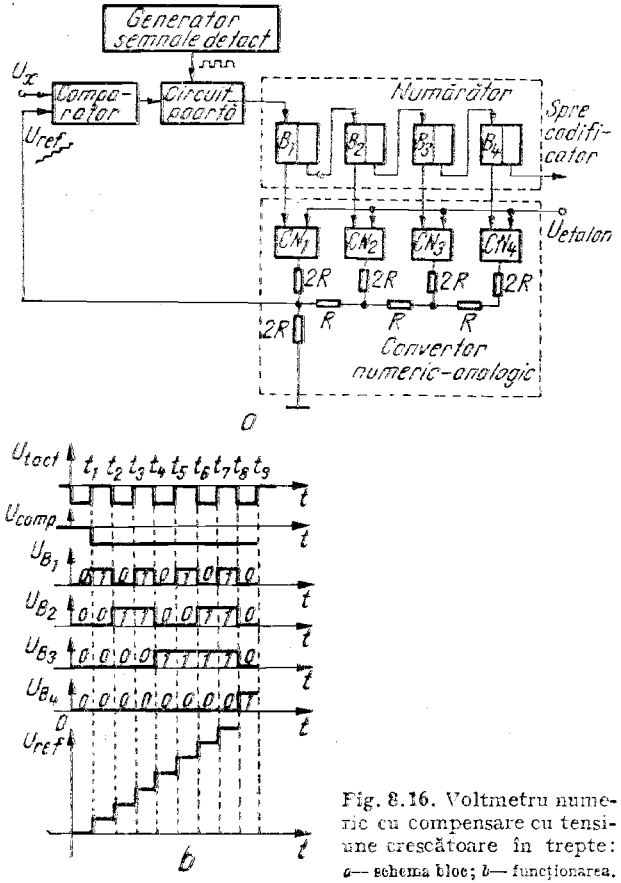


Fig. 8.16. Voltmetru numeric cu compensare cu tensiune crescătoare în trepte: *a*— schema bloc; *b*— funcționarea.

Partea principală a acestui aparat o formează **convertorul analog-numeric**, care conține un *comparator*, un *circuit poartă*, un *registru numeric* și un *convertor numeric-analog*.

Comparatorul compară tensiunea de măsurat cu tensiunea de referință generată de convertorul numeric-analog și, atît timp cît $U_x > U_{ref}$, comandă deschiderea circuitului poartă prin care trec impulsurile de la generatorul de tact spre registrul numeric. Acesta are rolul de a număra impulsurile primite și de a comanda comutatoarele de nivel $CN_1 \dots CN_4$, care introduc în circuit rezistențele unui divizor rezistiv, decodificator al convertorului numeric-analog.

● **Funcționarea** (fig. 8.16, *b*). *În situația inițială*, circuitele bistabile $B_1 \dots B_4$ ale registrului numeric sînt în starea zero, comutatoarele de nivel sînt blocate și, ca urmare, tensiunea de referință este zero. Circuitul comparator, primind o tensiune de măsurat $U_x > U_{ref}$, deschide poarta prin care încep să treacă spre registrul numeric impulsurile de la generatorul de tact.

La primul impuls, bistabilul B_1 basculează în starea 1 și comandă comutatorul de nivel CN_1, care introduce în circuit un grup de rezistențe astfel încît tensiunea de referință să fie egală cu o treaptă elementară de variație.

La cel de-al doilea impuls, bistabilul B_2 basculează în starea 1 și comandă comutatorul de nivel CN_2, care modifică distribuția rezistențelor în divizor, astfel încît tensiunea de referință să fie egală cu două trepte elementare de variație și așa mai departe.

Cînd tensiunea de referință egalează tensiunea de măsurat, comparatorul comandă închiderea circuitului poartă. În tot timpul cît poarta a fost deschisă, au trecut spre registrul numeric impulsuri de la generatorul de tact, care au fost numărate. În același timp, registrul numeric a comandat și convertorul numeric-analog, deci valoarea tensiunii de referință depinde de numărul impulsurilor care au trecut prin poartă. Prin urmare, rezultatul numărării indică valoarea tensiunii de referință și, implicit, și pe cea a tensiunii de măsurat.

Deoarece fiecare impuls corespunde cu o treaptă elementară de variație a tensiunii de referință, rezultatul numărării este decodificat și afișat numeric direct în volți.

d. MULTIMETRE DIGITALE

Multimetrele digitale sînt aparate destinate să măsoare diferite mărimi electrice ca: tensiuni continue și alternative, intensități ale curentului, rezistențe ș.a.

● **Principiul de funcționare.** În principiu, aceste aparate sînt alcătuite dintr-un voltmetru digital de curent continuu, prevăzut cu diferite circuite auxiliare care îi lărgesc posibilitățile de măsurare.

Astfel, *pentru măsurarea tensiunilor alternative*, semnalul de măsurat este transformat într-un semnal continuu cu ajutorul unor circuite de detecție.

Pentru măsurarea intensității curentului electric, curentul de măsurat este trecut prin rezistențe de precizie și se măsoară căderea de tensiune la bornele acestor rezistențe.

Pentru măsurarea rezistențelor, se trec prin ele curenți continui de precizie și se măsoară tensiunea la bornele lor.

Datorită unei precizii foarte bune și a comodității în manevrare, multimetrele numerice au căpătat o largă răspîndire, atît ca aparate de laborator, cît și ca aparate portabile.

● **Un exemplu de multimetru numeric** este *multimetrul portabil tip 6000 produs de firma Schlumberger*. Acest aparat măsoară:

— tensiuni continue de la 100 μV la 1 000 V, cu o precizie de 0,1%;

— tensiuni alternative de la 100 μV la 1 000 V, cu o precizie de 0,3%, în gama de frecvențe de la 40 Hz la 400 Hz;

— intensități ale curentului continuu de la 1 μA la 10 A, cu o precizie de 0,5%;

— intensități ale curentului alternativ de la 1 μA la 10 A, cu o precizie de 0,5%, în gama de frecvențe de la 40 Hz la 400 Hz;

— rezistențe de la 0,1 Ω, la 20 MΩ, cu o precizie de 0,5%.

Aparatul are reglaj de zero automat și alegerea polarității automată. Afișarea este realizată cu cristale lichide. Alimentarea se face de la două baterii de 9 V și are o autonomie de 200 ore.

Greutatea aparatului, inclusiv bateriile este de 625 g, iar dimensiunile sale sînt 178×146×58 mm.

Probleme și întrebări recapitulative

1. De ce aparatele de măsurat digitale sînt frecvent folosite în tehnica modernă?
2. Cît este rezoluția la un aparat care afișează cinci cifre, pe scara de 100 V (99,999 V)?
3. Ce număr zecimal corespunde numărului binar 110110?
4. Ce număr zecimal corespunde numărului binar zecimal 0001 1001 1000 0000?
5. Dacă un circuit bistabil ca cel din figura 8.3 este în starea 1 și i se aplică un impuls negativ pe intrarea 1, în ce stare va fi după aplicarea impulsului? Dar dacă impulsul negativ se aplică pe intrarea *C*, ce se va întîmpla?
6. Dacă un circuit bistabil ca cel din figura 8.3 este în starea 1, cum poate fi trecut în starea 0?
7. La un dispozitiv de afișare cu diode electroluminescente ca în figura 8.8 ce diode rămîn blocate cînd se afișează cifra 3? Dar cînd se afișează cifra 1, ce diode conduc?
8. De ce în ultimul timp dispozitivele de afișare cu cristale lichide au căpătat o largă utilizare?
9. La un frecvențmetru digital, dacă durata măsurării este de 0,1 s și se numără 10 000 de impulsuri corespunzătcare pericadelor semnalului de măsurat, ce frecvență se măsoară?
10. În timpul măsurării unui interval de timp cu un cronometru digital avînd frecvența bazei de timp 1000 Hz, trec spre numărător 22 500 impulsuri. Cît este valoarea intervalului de timp măsurat?

CAPITOLUL 9

APARATE PENTRU MĂSURAREA DISPOZITIVELOR SEMICONDUCTOARE

În ultima vreme dispozitivele semiconductoare au căpătat o largă utilizare în cele mai diferite domenii ale tehnicii și cunoașterea mai exactă a proprietăților acestora prin efectuarea unor măsurări a devenit din ce în ce mai necesară. Ca urmare, au fost elaborate diferite metode de măsurare și s-au construit diverse aparate pentru măsurarea și testarea dispozitivelor semiconductoare.

Pentru măsurarea tranzistoarelor, caracterizate printr-un număr mare de parametri și prin dispersia mare a acestora, au fost realizate diferite tipuri de aparate, cu diferite grade de complexitate.

A. TRANZISTORMETRE

Tranzistormetrele sînt *aparate destinate să evalueze rapid principalii parametri funcționali ai tranzistoarelor.*

1. BETAMETRELE

Cele mai simple tranzistormetre permit alimentarea tranzistoarelor corespunzător unui anumit punct static de funcționare și măsurarea factorului de amplificare în curent, în montaj emitor comun, cunoscut sub numele de „beta" (β) (de unde denumirea de *betametre* dată acestor aparate). Există foarte multe tipuri constructive de betametre.

Un exemplu de astfel de aparat este **tranzistormetrul tip E-0702** construit la I.E.M.I. — București. Acesta este un aparat de laborator, destinat verificării și măsurării tranzistoarelor *npn* și *pnp* de mică putere și a diodelor semiconductoare.

Tranzistormetrul tip E — 0702 permite:

— determinarea dispozitivelor semiconductoare defecte;

— măsurarea diodelor;

— alimentarea tranzistorului corespunzător unui punct static de funcționare;

— măsurarea factorului de amplificare în curent, în montaj emitor comun (h_{21_e});

— măsurarea curentului rezidual.

2. TRANZISTORMETRE PENTRU MĂSURAREA TUTUROR PARAMETRILOR „h"

Unele tranzistormetre sînt mai complexe, permițînd măsurarea tuturor parametrilor „h" (h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}). Cunoașterea parametrilor hibrizi („h") ai unui tranzistor este foarte importantă, deoarece ei stau la baza principalelor formule de calcul pentru circuitele tranzistorizate. Măsurarea lor este comodă, deoarece se efectuează cu intrarea tranzistorului în gol și ieșirea în scurtcircuit, condiții care sînt ușor de realizat în practică.

○ **Notă.** Deoarece parametrii „h" caracterizează funcționarea tranzistoarelor în curent alternativ, în cele ce urmează se vor nota cu i și u componentele alternative ale curenților și tensiunilor.

Există diferite tipuri de tranzistormetre care măsoară toți parametrii „h". În general, ele se compun din mai multe elemente care se comută între ele pentru a realiza montajele necesare măsurării fiecărui parametru „h". Se va analiza în continuare funcționarea unui astfel de aparat.

Pentru măsurarea parametrilor „h" este necesar ca tranzistorul de măsurat să fie alimentat în curent continuu. În acest scop se folosește schema din figura 9.1, *a* pentru montajul bază comună și schema din figura 9.1, *b* pentru montajul emitor comun.

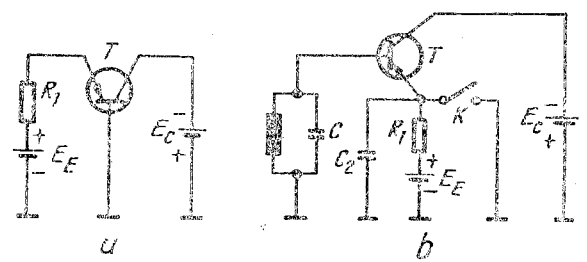


Fig. 9.1. Alimentarea în c.c. a tranzistoarelor.

În *circuitul de polarizare pentru montajul emitor comun*, emitorul este pus la masă pentru curentul alternativ prin condensatorul C_2 de reactanță foarte mică, iar baza este polarizată în curent continuu prin intermediul unui circuit LC acordat pe frecvența de lucru f_0. În acest mod, la frecvența f_0 circuitul LC prezentînd o impedanță mare ($Z_0 = QW_0L$), izolează în c.a. baza față de masă, în timp ce în c.c. se comportă ca o rezistență mică (rezistența bobinei), asigurînd polarizarea corectă pentru bază. Comutatorul K se deschide numai cînd se fac măsurările; în restul timpului el stă închis, pentru a împiedica încărcarea condensatorului C_2 de la tensiunea E_B în cazul în care tranzistorul nu este în soclu.

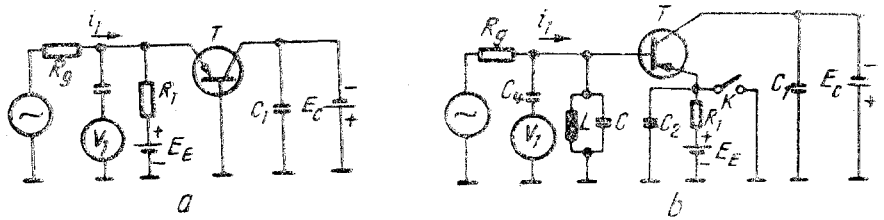


Fig. 9.2. Măsurarea parametrului h_{11}:
a — montaj bază comună; *b* — montaj emitor comun.

● **Măsurarea parametrului** h_{11} se realizează cu montajele din figura 9.1. Parametrul h_{11} reprezintă impedanța de intrare cu ieșirea în scurtcircuit:

$$h_{11} = \left|\frac{u_1}{i_1}\right|_{u_2} = 0. \qquad (9.1)$$

Pentru măsurarea parametrului h_{11}, peste alimentarea de curent continuu, se injectează în circuitul de intrare un curent cunoscut i_1 de la un generator de curent constant (generatorul de tensiune în serie cu rezistența R_g de valoare foarte mare) și se măsoară cu voltmetrul V_1 tensiunea u_1. Condiția de scurtcircuit la ieșire, în ceea ce privește c.a., se realizează cu ajutorul condensatorului C_1, a cărui reactanță trebuie să fie mult mai mică decît impedanța de ieșire a tranzistorului.

● **Măsurarea parametrului** h_{12} se realizează cu montajele din figura 9.3. Parametrul h_{12} reprezintă reacția internă a tranzistorului cînd intrarea este în gol:

$$h_{12} = \left|\frac{u_1}{u_2}\right|_{i_1} = 0. \qquad (9.2)$$

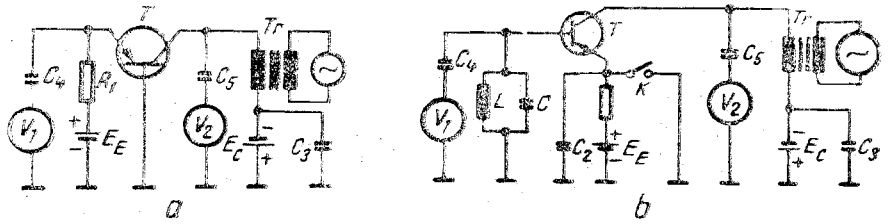


Fig. 9.3 Măsurarea parametrului h_{12}:
a — montaj bază comună; *b* — montaj emitor comun.

Deoarece $i_1 = 0$, semnalul alternativ se aplică în circuitul de ieșire sub forma unei tensiuni u_2, prin intermediul unui transformator. Tensiunile u_1 și u_2 se măsoară cu voltmetrele electronice V_1 și respectiv V_2. Condiția $i_1 = 0$ este satisfăcută la montajul de bază comună (fig. 9.3, *a*) dacă R_1 în paralel cu rezistența voltmetrului V_1 este mult mai mare decît impedanța de intrare a tranzistorului. La montajul emitor comun condiția este satisfăcută dacă rezistența voltmetrului V_1 în paralel cu impedanța Z_0 (a circuitului LC) este mult mai mare decît impedanța de intrare.

Condensatorul C_3 scurtcircuitează în c.a. sursa E_c, pentru ca componentele alternative să nu treacă prin sursă.

● **Măsurarea parametrului** h_{21} se realizează cu montajele din figura 9.4. Parametrul h_{21} reprezintă factorul de amplificare în curent cînd ieșirea este în scurtcircuit:

$$h_{21} = \left|\frac{i_2}{i_1}\right|_{u_2} = 0. \qquad (9.3)$$

Pentru măsurare, peste alimentarea de curent continuu se injectează în circuitul de intrare un curent cunoscut i_1 de la un generator de curent constant, iar în circuitul de ieșire se măsoară căderea de tensiune de la

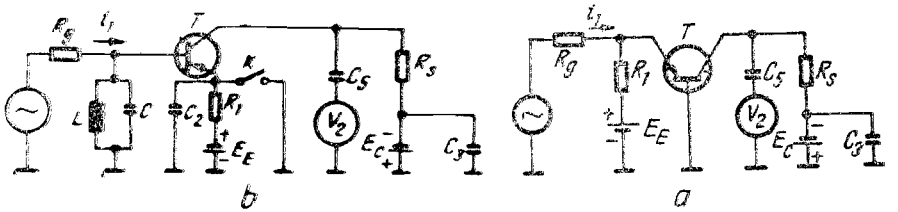


Fig. 9.4. Măsurarea parametrului h_{21}:
a — montaj bază comună; *b* — montaj emitor comun.

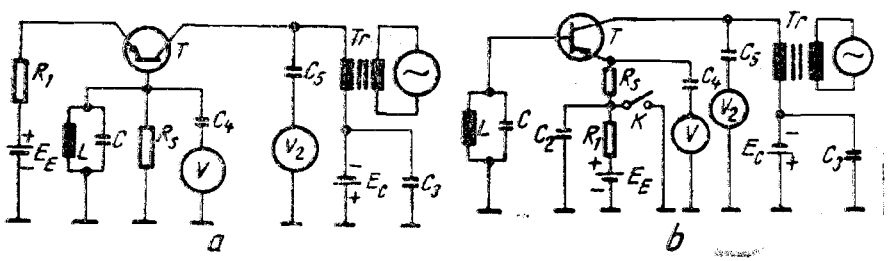


Fig. 9.5. Măsurarea parametrului h_{22}:
a — montaj bază comună; *b* — montaj emitor comun.

bornele rezistenței R_s cu voltmetrul V_2. Intensitatea curentului i_2 se calculează cu formula $i_2 = \frac{u_2}{R_s}$. Condiția $u_2 = 0$ este satisfăcută dacă R_s este mult mai mică decît impedanța de ieșire a tranzistorului. Condensatorul C_3, care în c.a. scurtcircuitează sursa E_c, trebuie să aibă reactanța mult mai mică decît R_s pentru ca pe C_3 căderea de tensiune alternativă să fie neglijabilă.

● **Măsurarea parametrului** h_{22} se realizează cu montajele din figura 9.5. Parametrul h_{22} reprezintă admitanța de ieșire cu intrarea în gol:

$$h_{22} = \left|\frac{u_2}{u_1}\right|_{i_1} = 0. \qquad (9.4)$$

Semnalul alternativ se aplică pe ieșire, peste alimentarea de curent continuu, sub forma unei tensiuni u_2, prin intermediul unui transformator. Tensiunea u_2 se măsoară cu voltmetrul V_2, iar curentul i_2 se măsoară indirect, prin căderea de tensiune la bornele rezistenței R_s montate în bază $\left(i_2 = \frac{u_{R_s}}{R_s}\right)$. Condiția $i_1 = 0$ se realizează dacă R_1 în paralel cu rezistența voltmetrului V_1 (R_v) este mult mai mare decît impedanța de intrare a tranzistorului pentru montajul bază comună și dacă R_v în paralel cu Z_0 este mult mai mare decît impedanța de intrare a tranzistorului pentru montajul emitor comun.

În cazul montajului bază comună ar trebui ca rezistența R_s montată în bază să fie cît mai mică. Avînd în vedere că $i_1 = 0$, $i_2 = i_b$, deci este un curent foarte mic, ceea ce face ca și u_{R_s} să fie foarte mică, și să fie nevoie de un voltmetru foarte sensibil pentru a o măsura. Pentru a putea folosi voltmetre mai puțin pretențioase, se folosește o rezistență R_s de valoare mai mare în paralel cu un circuit LC acordat pe frecvența de lucru, care în c.a. prezintă o impedanță foarte mare, neglijabilă față de R_s, iar în c.c. se comportă ca o rezistență mică (rezistența bobinei), care asigură polarizarea corectă a bazei.

B. CARACTEROGRAFE

Caracterografele *sînt aparate care permit vizualizarea caracteristicilor statice ale tranzistoarelor pe ecranul unui tub catodic.* Pentru ca pe ecranul unui tub catodic să apară o caracteristică $I_C = f(U_{CE})$, este necesar ca între plăcile de deflexie pe orizontală să se aplice o tensiune proporțională cu U_{CE}, iar între plăcile de deflexie pe verticală să se aplice o tensiune proporțională cu I_C. Tensiunea U_{CE} trebuie să varieze de la zero la valoarea maximă pentru care interesează caracteristica.

Pentru a se obține o familie de caracteristici corespunzătoare la diferite valori ale curentului de bază, acesta va fi variat în trepte. Dacă treptele se succed cu o frecvență suficient de mare, datorită remanenței ecranului și remanenței ochiului omenesc, pe ecran se văd toate caracteristicile simultan.

● **Schema bloc** a unui caracterograf este reprezentată în figura 9.6. Redresorul alimentează colectorul tranzistorului cu tensiune pulsatorie, asigurînd variația periodică a tensiunii U_{CE} de la zero la o valoare maximă care poate fi reglată cu un autotransformator reglabil montat pe intrarea redresorului.

Pentru ca pe ecranul tubului catodic să apară caracteristica de vizualizat, tensiunea U_{CE} se aplică în același timp și la plăcile X ale tubului catodic prin intermediul amplificatorului $A_x (U_x = KU_{CE})$, iar la plăcile Y se aplică, prin intermediul amplificatorului A_y, o tensiune proporțională cu curentul I_C. Această tensiune se culege de la bor-

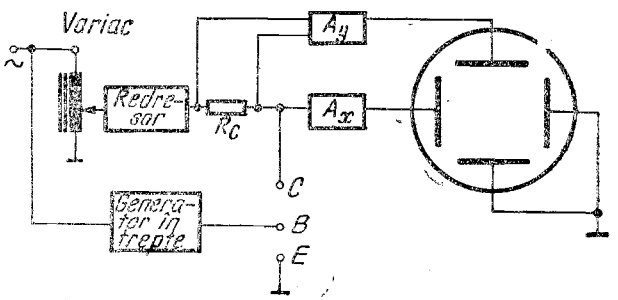


Fig. 9.6. Schema bloc simplificată a unui caracterograf.

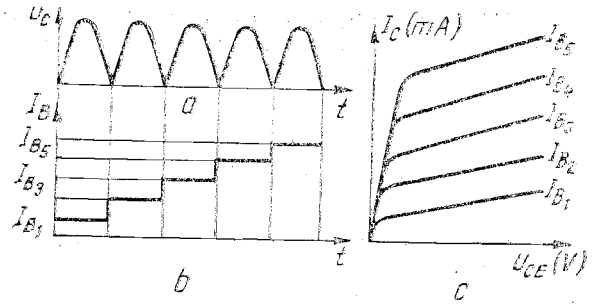


Fig. 9.7. Variația tensiunii de colector (*a*); variația în trepte a curentului de bază (*b*); caracteristicile care se vizualizează (*c*).

nele rezistenței R_C montate în colectorul tranzistorului de măsurat, deci parcurse de curentul de colector al acestuia ($U_y = R_C I_C$).

Pentru obținerea mai multor caracteristici, corespunzătoare la mai multe valori ale curentului de bază I_B, acesta este variat în trepte de generatorul în trepte, care este sincronizat cu tensiunea de colector. Fiecărei trepte îi corespunde un anumit I_B, deci o anumită caracteristică.

● **Funcționarea.** După cum arată diagramele din figura 9.7, în timpul primei variații a tensiunii de colector (în timpul primei alternanțe redresate) curentul de bază I_B are valoarea corespunzătoare primei trepte și se vizualizează prima caracteristică (cea mai de jos din figura 9.7, *c*). La a doua variație a tensiunii de colector (în timpul celei de-a doua alternanțe redresate) curentul I_B are o nouă valoare, corespunzătoare celei de-a doua trepte și se vizualizează cea de-a doua caracteristică ș.a. m.d. Dacă treptele se succed suficient de repede, pe ecran se văd toate caracteristicile simultan.

○ **Notă.** În afara vizualizării de caracteristici, pe caracterograf se pot determina și valorile unor parametri cum ar fi: h_{21e}, I_{CEO} etc. De asemenea, există posibilitatea selectării tranzistoarelor perechi.

Probleme și întrebări recapitulative

1. De ce sînt necesare măsurările asupra dispozitivelor semiconductoare?
2. Enumerați elementele componente ale tranzistorului pentru măsurarea tuturor parametrilor „*h*"!.
3. Cum se realizează condiția de gol la intrare în cazul tranzistormetrului studiat? Dar condiția de scurtcircuit la ieșire?

CAPITOLUL 10

GENERATOARE DE SEMNAL

A. GENERALITĂȚI

Generatoarele de semnal sînt aparate auxiliare folosite în tehnica măsurărilor. Aceste aparate produc semnale electrice de forme și frecvențe diferite, care imită semnalele cu care lucrează în mod normal circuitele electrice și electronice. Ele se folosesc la verificarea, reglarea, depanarea și măsurarea diferitelor aparate și instalații.

De exemplu, pentru verificarea unui radioreceptor trebuie să se aplice la intrarea acestuia un semnal sinusoidal modulat în amplitudine sau în frecvență, asemănător cu semnalul captat de antena radioreceptorului în funcționarea lui normală; la măsurări asupra unui calculator trebuie să i se aplice acestuia semnale sub forma unor impulsuri, asemănătoare cu cele furnizate de echipamentele periferice de intrare ale calculatoarelor etc.

1. CLASIFICARE

Generatoarele de semnal se pot clasifica după mai multe criterii.

● **După forma semnalului generat**, generatoarele pot fi:

— *generatoare de semnale sinusoidale*, care la rîndul lor pot fi nemodulate sau modulate în amplitudine (*MA*) sau în frecvență (*MF*);

— *generatoare de impulsuri dreptunghiulare*;

— *generatoare de tensiuni liniar-variabile* (*TLV*), care pot avea forma unor triunghiuri isoscele sau forma dinților de ferăstrău;

— *generatoare de impulsuri scurte* (durata impulsurilor este mult mai mică decît perioada lor de repetiție);

— *generatoare de funcții*, care pot genera semnale de mai multe forme (sinusoidale, dreptunghiulare, tensiuni liniar-variabile, impulsuri scurte și altele).

● **După frecvența semnalului generat**, generatoarele pot fi:

— *generatoare de joasă frecvență*, care generează semnale cu frecvențe cuprinse între fracțiuni de herț și megaherți;

— *generatoare de audiofrecvență* (20 Hz — 20 kHz);

— *generatoare de videofrecvență* (10 Hz — 10 MHz);

— *generatoare de înaltă frecvență sau de radiofrecvență*, care generează semnale cu frecvențe cuprinse între zeci de kiloherți și zeci de gigaherți.

2. CARACTERISTICI TEHNICE

La alegerea unui generator de semnale în scopul unei anumite utilizări, trebuie avute în vedere o serie de caracteristici tehnice care vor fi prezentate în continuare:

— *forma semnalului*, care poate fi sinusoidală, dreptunghiulară, liniar-variabilă, impulsuri scurte etc.;

— *intervalul de frecvență*, definit prin frecvența minimă și frecvență maximă la care poate lucra aparatul. La unele generatoare se indică și gamele de frecvență, adică intervalele în care frecvența poate fi variată continuu;

— *nivelul maxim la ieșire*. În general se indică tensiunea la ieșire, ca amplitudine la semnalele nesinusoidale sau ca valoare eficace în cazul semnalelor sinusoidale. La generatoarele de înaltă frecvență se specifică de obicei puterea maximă obținută la ieșire;

— *atenuarea maximă*, cea continuă și, dacă există și cea în trepte, specificată de obicei în decibeli;

— *impedanța de ieșire*. De obicei generatoarele se realizează ca *generatoare de tensiune constantă*. În acest caz, impedanța generatorului trebuie să fie mult mai mică decît impedanța de sarcină ($Z_g \ll Z_s$). Impedanța de ieșire la generatoarele de tensiune constantă este de ordinul ohmilor sau zecilor de ohmi. Există și *generatoare de curent constant*, la care impedanța de ieșire trebuie să fie mult mai mare decît impedanța de sarcină ($Z_g \gg Z_s$). În acest caz, impedanța de ieșire a generatorului este de zeci sau sute de kiloohmi. La nevoie, un generator de tensiune constantă se poate transforma într-un generator de curent constant, dacă i se adaugă în serie o impedanță suficient de mare. Uneori este necesar să se realizeze o adaptare între generator și impedanța de sarcină ($Z_g = Z_s$). În acest scop, unele generatoare sînt prevăzute și cu o ieșire pe o impedanță standardizată Z_0 (50 Ω, 75 Ω, 200 Ω, 600 Ω);

— *caracteristica de frecvență*, care reprezintă variația nivelului semnalului de la ieșire în funcție de frecvență. Se exprimă de obicei în decibeli;

— *stabilitatea de frecvență*, care se definește prin raportul $\frac{\Delta f}{f}$ între variația nedorită a frecvenței și frecvența de oscilație;

— *stabilitatea de amplitudine*, care se definește prin raportul $\frac{\Delta U}{U}$ între variația nedorită a amplitudinii și amplitudinea U a tensiunii la ieșire;

— *distorsiunile neliniare*, care apar datorită neliniarității unor componente electronice. În cazul semnalelor sinusoidale, distorsiunile neliniare se apreciază prin coeficientul de distorsiuni neliniare:

$$\delta = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \ldots + U_n^2}}{U_1} 100\,[\%]. \qquad (10.1)$$

unde U_2, U_3 ... U_n sînt amplitudinile unor semnale nedorite de frecvențe $2f$, $3f$ ... nf (armonici), iar U_1 este amplitudinea semnalului sinusoidal fundamental (de frecvență dorită);

— *parametrii de modulație*. În cazul semnalelor modulate se specifică frecvența de modulație, gradul de modulație m la modulația de amplitudine sau deviația de frecvență Δf în cazul modulației de frecvență.

În cazul generatoarelor de impulsuri se indică:

— *durata impulsurilor*;

— *factorul de umplere*, definit ca raportul între durata impulsurilor și durata perioadei lor de repetiție;

— *durata fronturilor*, definită prin timpul în care tensiunea crește de la 10% la 90% din amplitudinea sa.

B. GENERATOARE DE SEMNALE SINUSOIDALE

Generatoarele de semnale sinusoidale sînt cele mai răspîndite. Ele se caracterizează prin faptul că semnalul generat trebuie să conțină o singură componentă sinusoidală:

$$u = U_{max} \sin 2\pi ft. \qquad (10.2)$$

Generatoarele sinusoidale au de obicei o **schemă bloc** ca cea reprezentată în figura 10.1 și conțin: un *oscilator*, un *etaj separator*, un *amplificator* și un *atenuator*.

● **Oscilatorul** este circuitul în care se produc oscilațiile sinusoidale întreținute. Frecvența acestor oscilații depinde de parametrii elemen-

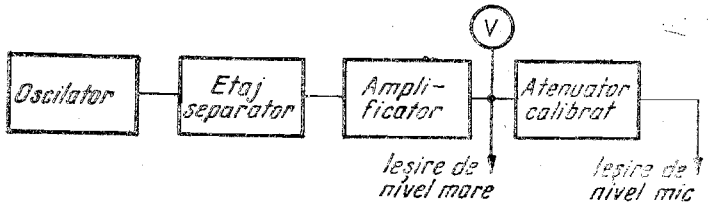


Fig. 10.1. Schema bloc a unui generator de semnale sinusoidale.

telor de circuit ce compun oscilatorul (rezistențe, capacități sau inductanțe) și poate fi variată în trepte sau continuu, prin modificarea parametrilor respectivi.

● **Etajul separator** separă oscilatorul de sarcina de la ieșirea generatorului, pentru ca regimul de funcționare al oscilatorului să nu fie influențat de variațiile impedanței de sarcină, care variază în limite largi de la o măsurare la alta.

● **Amplificatorul** amplifică semnalele generate de oscilator, asigurînd nivelul maxim la ieșirea generatorului și impedanța de ieșire necesară. Ieșirea amplificatorului este și ieșirea de nivel mare a generatorului, la care se obține o tensiune de ordinul volților, reglabilă continuu cu un potențiometru montat în amplificator. Nivelul semnalului obținut la ieșirea de nivel mare este indicat de un voltmetru electronic sau este marcat pe potențiometrul ce reglează acest nivel.

● **Atenuatorul** are rolul de a reduce semnalul de ieșire de un anumit număr de ori, fără a-l deforma. Atenuatoarele sînt de obicei calibrate, adică se indică pentru fiecare poziția atenuarea introdusă. De exemplu: $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, —10 dB, —20 dB.

După modul în care se obțin oscilațiile, **generatoarele de semnale sinusoidale** sînt de *tip LC* sau de *tip RC*.

1. GENERATOARE DE SEMNALE SINUSOIDALE DE TIP *RC*

Generatoarele *RC* generează semnale în domeniul frecvențelor joase, de la fracțiuni de herț la magaherți.

Pentru obținerea semnalelor sinusoidale, aceste generatoare folosesc oscilatoare de tip *RC*.

○ **Observație.** Oscilatoarele de tip *RC* sînt de fapt amplificatoare cu reacție pozitivă selectivă.

Reacția în amplificatoarele electronice constă în aplicarea unei părți din semnalul de la ieșirea amplificatorului la intrarea acestuia, printr-un circuit de reacție (fig. 10.2). Dacă semnalul care se întoarce este în fază cu semnalul de la intrare, *reacția* este *pozitivă*, iar dacă este în antifază — *reacția* este *negativă*. *Reacția pozitivă selectivă* este o reacție care devine pozitivă pentru o singură frecvență.

Fig. 10.2. Amplificator cu reacție.

În teoria amplificatoarelor se demonstrează că:

$$A' = \frac{A}{1 - \beta A}, \tag{10.3}$$

unde:

A' este amplificarea cu reacție;

A — amplificarea fără reacție;

$\beta = \frac{U_{reacție}}{U_{ieșire}}$ — factorul de reacție.

Se observă că *în cazul în care* $\beta A = 1$ *amplificarea cu reacție devine infinită și* **amplificatorul se transformă într-un oscilator**, adică prezintă semnal la ieșire chiar dacă nu i se aplică nici un semnal la intrare.

Relația $\beta A = 1$ reprezintă *condiția de oscilație*, cunoscută și sub numele de *condiția lui Barkhausen*.

Pentru ca reacția să fie pozitivă, deci pentru ca semnalul de reacție să fie în fază cu semnalul de la intrare, trebuie ca:

$$\varphi_A + \varphi_B = 2K\pi, \tag{10.4}$$

unde φ_A este defazajul introdus de amplificator, iar φ_B este defazajul introdus de circuitul de reacție.

a. OSCILATOARE *RC* CU DEFAZARE

În general, un etaj de amplificare introduce între intrarea și ieșirea sa un defazaj egal cu π. Dacă amplificatorul este realizat cu un singur etaj de amplificare, *circuitul de reacție trebuie să introducă și el un defazaj de* π pentru ca pe total să se obțină $2K\pi$.

● **Defazajul se poate obține** fie *cu bobine*, fie *cu condensatoare*, dar în practică se preferă condensatoarele, deoarece sînt mai ușor de realizat.

Se știe că un condensator ideal, alimentat în curent alternativ sinusoidal, defazează curentul înaintea tensiunii cu $\frac{\pi}{2}$. Condensatoarele reale însă introduc un defazaj ceva mai mic de $\frac{\pi}{2}$. Din acest motiv, pentru a obține un defazaj de π sînt necesare cel puțin trei condensatoare. Acestea se combină cu rezistențe, formînd circuite *RC*.

În figura 10.2 este reprezentat un circuit *RC* pentru care se poate demonstra că defazajul între tensiunea de intrare U_1 și tensiunea de ieșire U_2 este dat de relația:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{2\pi fC}. \qquad (10.5)$$

În relația (10.5) se observă că defazajul este dependent de frecvență; pentru anumite valori ale lui R și C se obține defazajul dorit numai pentru o singură frecvență.

Folosind asemenea circuite se poate realiza o reacție pozitivă selectivă, deci se pot obține oscilatoare *RC*.

● După poziția grupurilor *RC*, se pot întîlni **două variante de oscilator *RC* cu defazare.** În figura 10.3 este reprezentată schema unui *oscilator RC cu rețea de defazare de tip trece-sus*, la care frecvența de oscilație se poate calcula cu formula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6 + \frac{4R_c}{R}}}, \qquad (10.6)$$

unde R, C și R_c sînt specificate pe figură.

În figura 10.4 este reprezentată schema *oscilatorului RC cu rețea de defazare de tip trece-jos*, la care frecvența de oscilație se poate calcula cu formula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}\sqrt{6 + \frac{4R_c}{R}}, \qquad (10.7)$$

unde R, C și R_c sînt specificate pe figură.

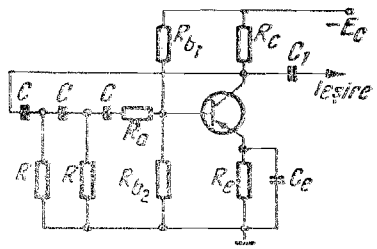


Fig. 10.3. Oscilator *RC* cu rețea trece-sus.

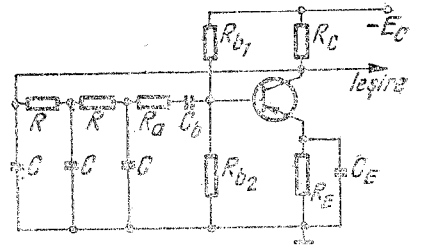


Fig. 10.4. Oscilator *RC* cu rețea trece-jos.

b. OSCILATOARE *RC* CU DEFAZAJ NUL

● Dacă oscilatorul este realizat cu două etaje de amplificare, acestea introduc un defazaj de 2π și, în consecință, circuitul de reacție trebuie să prezinte un defazaj nul. Pentru ca reacția să fie selectivă, defazajul nul trebuie să se obțină numai pentru o singură frecvență. În acest scop se folosesc **circuite selective**, cum sînt:

— *puntea Wien* (fig. 10.5, *a*);
— *circuitul dublu T* (fig. 10.5, *b*);
— *circuitul în T podit* (fig. 10.5, *c*).

● În figura 10.6 este reprezentată **schema unui oscilator cu punte Wien realizat cu două etaje de amplificare.** Circuitul de reacție este sub forma unei punți Wien, în care R_1C_1, R_2C_2, R_3 și R_4 alcătuiesc cele patru brațe. Pe o diagonală puntea primește semnal de la ieșirea amplificatorului (punctele A, B), iar pe cealaltă diagonală se obține semnalul de reacție ce se aplică la intrarea amplificatorului (punctele C, D).

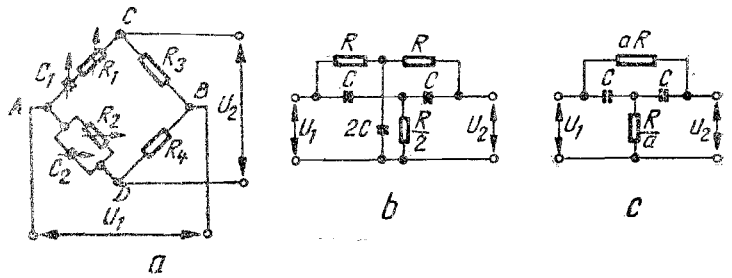


Fig. 10.5. Circuite selective folosite în oscilatoare *RC* cu defazaj nul.

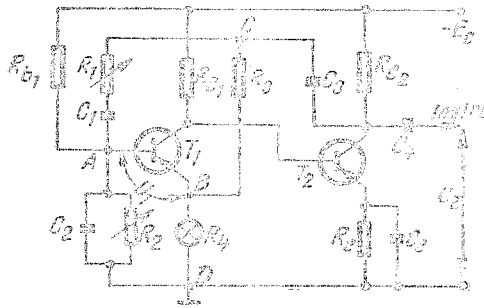


Fig. 10.6. Oscilator *RC* cu punte Wien.

Cînd punțea este în echilibru, defazajul este nul și se îndeplinește condiția de reacție pozitivă. Echilibrarea punții se realizează însă numai pentru o singură frecvență:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}. \quad (10.8)$$

Dacă $R_1 = R_2 = R$ și $C_1 = C_2 = C$, relația (10.8) devine:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (10.9)$$

Frecvența de oscilație se poate regla variind rezistențele R sau condensatoarele C. De obicei, una dintre mărimi se schimbă în trepte schimbînd gama de frecvențe, iar cealaltă variază continuu obținîndu-se variația frecvenței în cadrul unei game.

Pentru *stabilizarea amplitudinii tensiunii de ieșire*, rezistența R_4 din emitorul tranzistorului T_1 este realizată cu un bec. Cînd curentul de emitor crește, becul se încălzește, rezistența R_4 crește și ca urmare amplificarea scade, reducînd amplitudinea curentului de emitor.

2. OSCILATOARE *LC*

După cum le spune și numele, oscilatoarele *LC* conțin un *circuit oscilant LC* și un *amplificator cu reacție pozitivă*.

Sub acțiunea unui impuls de energie, circuitele *LC* au proprietatea de a oscila liber, producînd oscilații sinusoidale a căror frecvență depinde de valorile inductanței L și capacității C:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (10.10)$$

Un circuit *LC*, singur, produce oscilații, dar nu le poate întreține. Datorită pierderilor de energie pe rezistențele proprii ale bobinei și condensatorului, oscilațiile au amplitudinile din ce în ce mai mici, adică sînt amortizate. Pentru ca amplitudinea să rămînă constantă, este necesar să se compenseze pierderile de energie folosind elemente active de circuit (tuburi electronice sau tranzistoare). În acest caz, tubul electronic sau tranzistorul este alimentat cu energie de c.c., pe care o transformă în energie de c.a. ce este apoi cedată circuitului *LC* în ritmul de oscilație al acestuia (la fiecare oscilație circuitul *LC* primește o cantitate de energie egală cu cea pe care el o pierde).

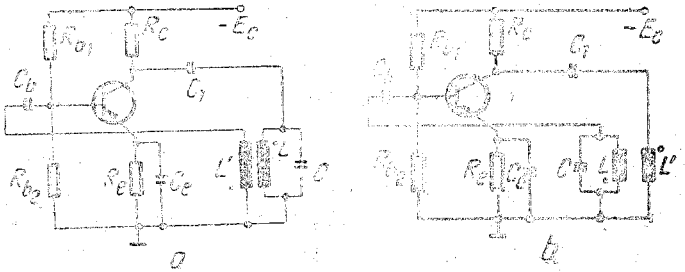


Fig. 10.7. Oscilatoare *LC* cu cuplaj inductiv.

Elementul activ de circuit — tubul electronic sau tranzistorul — trebuie să funcționeze cu reacție pozitivă. Aceasta se poate realiza prin *cuplaj inductiv* sau cu *montaje în trei puncte*.

● Exemple de **oscilatoare cu cuplaj inductiv** realizate cu tranzistoare sînt prezentate în figura 10.7. La aceste oscilatoare reacția între circuitul de colector (de ieșire) și circuitul de bază (de intrare) se realizează prin bobine cuplate inductiv, dintre care una face parte din circuitul oscilant. Circuitul oscilant poate fi conectat în colectorul tranzistorului (figura 10.7, *a*) sau în baza acestuia (fig. 10.7, *b*).

● La **oscilatoarele în trei puncte**, legătura între circuitul *LC* și elementul activ de circuit se face în trei puncte, alegînd o priză pe circuitul oscilant. Se pot realiza două variante de oscilator în trei puncte: *cu priză pe bobină*, numit și oscilator de *tip Hartley* (fig. 10.8, *a*) sau *cu priză pe condensator*, numit și oscilator de *tip Colpitts* (fig. 10.8, *b*). În ambele variante, pentru a se obține reacția pozitivă priza este legată în emitorul tranzistorului. În acest mod, semnalul aplicat pe

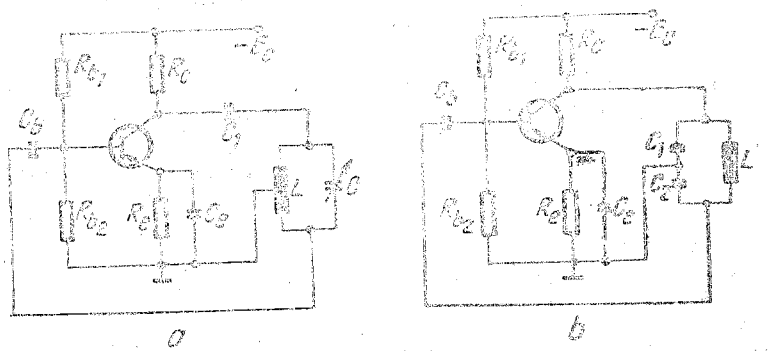


Fig. 10.8. Oscilatoare *LC* în trei puncte:
a — Hartley; *b* Colpitts.

bază de la un capăt al circuitului *LC* este în antifază cu semnalul din colector, deci de la celălalt capăt al circuitului *LC*. Tranzistorul introduce un defazaj de 180°, astfel încît după amplificare semnalul ajunge în colector în fază cu semnalul de pe circuitul oscilant, deci se obține reacție pozitivă.

○ **Notă.** Oscilatoarele *LC* se realizează de obicei pentru frecvențe înalte. La frecvențe joase inductanța *L* și capacitatea *C* ar trebui să aibă valori foarte mari, ceea ce se obține mai greu în practică.

Frecvența semnalului generat se poate varia modificînd inducția *L* sau capacitatea *C*. De obicei variațiile continue se realizează prin variația capacității, iar variațiile în trepte (schimbarea gamelor) — prin comutarea bobinelor.

C. GENERATOARE DE SEMNALE DREPTUNGHIULARE

Pe lîngă semnalele sinusoidale, în tehnica măsurărilor electrice și electronice se folosesc frecvent și semnale dreptunghiulare. Aceste semnale, reprezentate în figura 10.9, se caracterizează prin *paliere*, în timpul cărora tensiunea rămîne constantă, și prin *fronturi* în timpul cărora tensiunea variază rapid între două valori. Cu cît durata fronturilor este mai mică, cu atît forma semnalului este mai apropiată de forma dreptunghiulară.

Semnalele dreptunghiulare se pot obține *din semnale sinusoidale* prin modificări și limitări succesive sau *direct*, folosind circuite basculante.

1. GENERATOARE DE SEMNALE DREPTUNGHIULARE CU LIMITATOARE

Generatoarele de semnale dreptunghiulare cu limitări și amplificări succesive (fig. 10.10) sînt alcătuite dintr-un oscilator (generator de semnale sinusoidale) și mai multe etaje de amplificare și limitare.

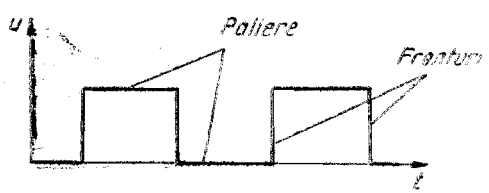


Fig. 10.9. Semnal dreptunghiular.

● **Oscilatorul sinusoidal** poate fi de tip *LC* sau *RC*.

● **Amplificatoarele** folosite în aceste generatoare trebuie să fie în bandă largă, pentru a amplifica toate componentele semnalelor dreptunghiulare (conform expresiei (10.10)).

Fig. 10.10. Schema bloc a unui generator de semnale dreptunghiulare, cu amplificări și limitări succesive.

● **Limitatoarele** sînt circuite care mențin tensiunea la ieșirea lor constantă, dacă tensiunea ce li se aplică la intrare depășește un anumit nivel, numit *prag de limitare*. Limitatoarele se pot realiza *cu diode* sau *cu tranzistoare*.

Un *limitator cu diode* este reprezentat în figura 10.11, *a*. El conține două diode polarizate invers cu cîte o tensiune E și o rezistență R de valoare mult mai mare decît rezistența de conducție a diodelor. Dacă la intrarea unui astfel de circuit se aplică o tensiune sinusoidală u_1, atît timp cît $|u_1| < E$ ambele diode sînt blocate și tensiunea de la ieșirea circuitului va urmări tensiunea de la intrare ($u_2 = u_1$). Cînd $|u_1| > E$, dioda care are anodul mai pozitiv decît catodul va conduce și tensiunea de la ieșirea limitatorului va fi constantă și egală cu E (neglijînd căderea de tensiune pe diodă). Graficul de variație a tensiunilor u_1 și u_2 este reprezentat în figura 10.11, *b*.

Din graficul $u_2 = f(t)$ se observă că la ieșirea limitatorului s-a obținut un semnal care nu mai este sinusoidal, dar care nu este încă nici dreptunghiular, fronturile avînd o durată destul de mare în comparație cu durata semnalului. Pentru a obține fronturi cît mai bune, semnalele obținute după prima limitare se amplifică și se limitează din nou. Cu cît amplificarea și limitarea se vor repeta de mai multe ori, cu atît forma semnalului obținut va fi mai apropiată de forma dreptunghiulară.

Generatoarele cu limitări și amplificări succesive sînt aparate complicate, dar au o frecvență precisă și stabilă (calități asigurate de oscilatorul sinusoidal).

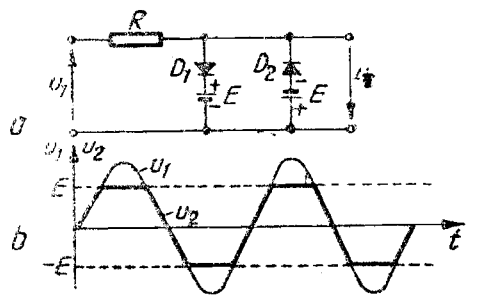


Fig. 10.11. Limitator cu diode.

Semnalele dreptunghiulare pot fi generate și direct, folosind circuite basculante, dintre care cel mai frecvent se întîlnesc *circuitele basculante astabile*.

● **Un circuit basculant** este realizat cu două tranzistoare, T_1 și T_2, conectate între ele în așa fel încît niciodată cele două tranzistoare nu pot conduce simultan. Pentru un astfel de circuit sînt posibile două stări: una în care T_1 conduce și T_2 este blocat și a doua în care T_1 este blocat și T_2 conduce. Trecerea dintr-o stare în alta se face rapid, de unde și numele de circuit basculant.

● **La un circuit basculant astabil** cele două stări posibile nu sînt stabile, trecerea dintr-o stare în alta făcîndu-se automat fără nici o acțiune din exterior.

În figura 10.12, *a* este prezentată schema unui circuit basculant astabil realizat cu două tranzistoare *npn*, T_1 și T_2.

● **Pentru analizarea funcționării acestui circuit** se presupune că la un moment dat ($t = t_1$) se produce o basculare (tranzistorul T_1 care era blocat începe să conducă și T_2 se blochează). Variațiile tensiunilor U_{c1}, U_{c2}, U_{b1} și U_{b2} sînt prezentate în figura 10.12, *b*. La $t > t_1$, după basculare, T_1 conduce și în colectorul lui tensiunea este foarte mică ($U_{c1} = E_c - I_{c1} R_{c1}$); în schimb, în colectorul lui T_2, care este blocat, tensiunea este $U_{c2} = E_c$. Tensiunea în baza lui T_1 este $U_{b1} \cong 0{,}7$ V (tensiunea de deschidere a unui tranzistor *npn*).

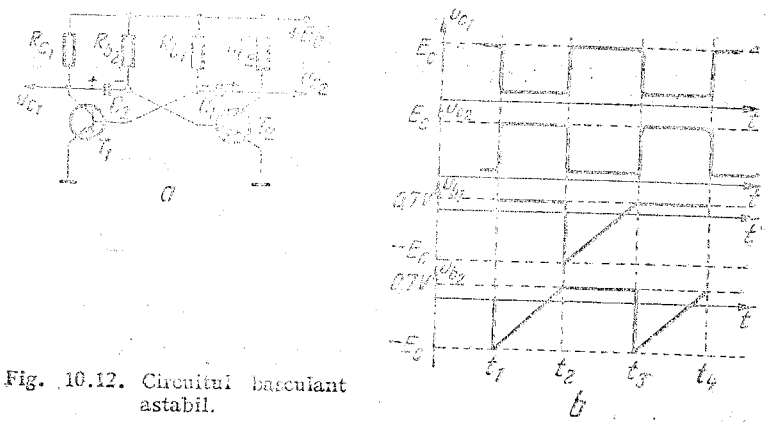


Fig. 10.12. Circuitul basculant astabil.

Condensatorul C_1 se încarcă rapid prin R_{c2} și prin joncțiunea emitor—bază a lui T_1 pînă la o tensiune aproximativ egală cu E_c, cu polaritatea din figură.

Baza tranzistorului T_2, care este blocat, este legată la condensatorul C_2, care în momentul basculării era încărcat la o tensiune aproximativ egală cu E_c, deci $U_{b2} \cong -E_c$. După basculare, condensatorul C_2 se descarcă prin R_{b2} pînă la zero și apoi tinde să se încarce cu polaritate inversă.

La $t = t_2$, tensiunea pe condensatorul C_2 ajunge la valoarea tensiunii de deschidere a tranzistorului T_2 ($U_{b2} \cong 0{,}7$ V). T_2 începe să conducă și automat T_1 se blochează, producîndu-se o nouă basculare. Timpul în care T_1 a fost în stare de conducție și T_2 a fost blocat depinde de timpul de descărcare a condensatorului C_2, deci de constanta de timp $\tau_2 = C_2 R_{b2}$.

După cea de-a doua basculare T_1 este blocat și în colectorul lui tensiunea este $U_{c1} = E_c$, în timp ce T_2 conduce și tensiunea $U_{c2} = E_c - I_{c2} R_{c2}$ este mică. De această dată condensatorul C_1, care în momentul basculării era încărcat la o tensiune de aproximativ E_c, se descarcă prin R_{b1} pînă la zero și tinde apoi să se încarce cu polaritate inversă.

La $t = t_3$, $U_{b1} \cong 0{,}7$ V și ca urmare T_1 începe să conducă și implicit T_2 se blochează. Timpul în care T_2 a fost în stare de conducție și T_1 a fost blocat depinde de constanta de timp de descărcare a condensatorului C_1, $\tau_1 = C_1 R_{b1}$.

În continuare, fenomenele se repetă astfel încît tensiunile în colectoarele celor două tranzistoare variază după o formă dreptunghiulară. Dacă $\tau_1 = \tau_2$ se obțin semnale dreptunghiulare la care cele două alternanțe sînt egale. Dacă $\tau_1 \neq \tau_2$ se obțin semnale cu alternanțe inegale.

Frecvența semnalelor dreptunghiulare obținute depinde de valorile elementelor C_1, R_{c1}, C_2 și R_{c2} și poate fi reglată variind aceste elemente.

● **Generatoarele de semnale dreptunghiulare cu circuite astabile mai conțin** un *limitator* pentru uniformizarea palierelor, *un amplificator* care asigură nivelul necesar la ieșire și impedanța de ieșire și, eventual, un *atenuator calibrat*.

D. GENERATOARE DE TENSIUNI LINIAR-VARIABILE (TLV)

Generatoarele TLV se întîlnesc într-o mare varietate constructivă. În general, obținerea tensiunilor liniar-variabile se bazează pe *încărcarea și descărcarea unui condensator sub curent constant*, așa cum s-a văzut și la generatoarele bază de timp ale osciloscoapelor.

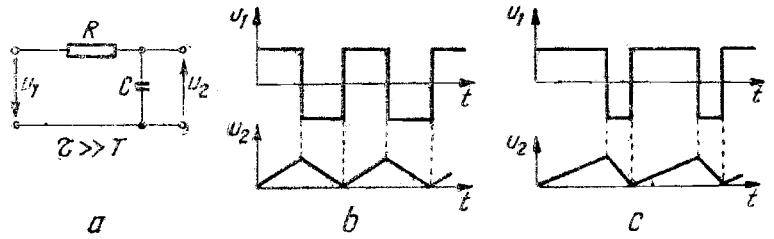


Fig. 10.13. Circuite cu integrare.

Tensiunile liniar-variabile se pot obține și *din tensiuni dreptunghiulare, folosind* circuite de formare cunoscute sub numele de *circuite de integrare.*

Un **circuit de integrare** este un circuit *RC* cu ieșire pe condensator (fig. 10.13, *a*), la care constanta de timp $\tau = RC$ este mult mai mare decît perioada de repetiție a semnalelor ce se aplică la intrare. După cum se observă, tensiunea la ieșirea unui astfel de circuit este tensiunea de la bornele condensatorului. Aplicînd la intrare un semnal dreptunghiular, în timpul alternanțelor pozitive condensatorul se încarcă și, datorită constantei mari de timp, tensiunea la bornele sale crește liniar. Din același motiv, în timpul alternanțelor negative, cînd condensatorul se descarcă, tensiunea la bornele sale descrește liniar. În acest mod semnalele dreptunghiulare se transformă în semnale triunghiulare la care tensiunea variază liniar în timp.

Dacă semnalele dreptunghiulare aplicate la intrare au alternanțele egale, semnalul de la ieșire va fi de forma unor triunghiuri isoscele (fig. 10.13, *b*). Dacă semnalul aplicat la intrare are alternanțele neegale, tensiunea de la ieșire va prezenta pante de creștere și descreștere diferite (fig. 10.13, *c*).

E. GENERATOARE DE IMPULSURI SCURTE

În foarte multe aplicații practice se folosesc semnale sub forma unor impulsuri scurte, adică la care durata impulsurilor este mult mai mică decît perioada lor de repetiție.

Impulsurile scurte se obțin de obicei *din semnale dreptunghiulare, folosind* circuite de formare cunoscute sub numele de *circuite de derivare.*

Un **circuit de derivare** (fig. 10.14, *a*) este un circuit *RC* cu ieșire pe rezistență, la care constanta de timp $\tau = RC$ este mult mai mică decît perioada de repetiție a semnalelor ce se aplică la intrare. Tensiunea la ieșire este proporțională cu curentul de încărcare sau de descărcare al condensatorului. Dacă constanta de timp este foarte mică, condensatorul se încarcă și se descarcă rapid, iar la ieșire se culege semnal numai pe durata încărcării și, respectiv, a descărcării condensatorului.

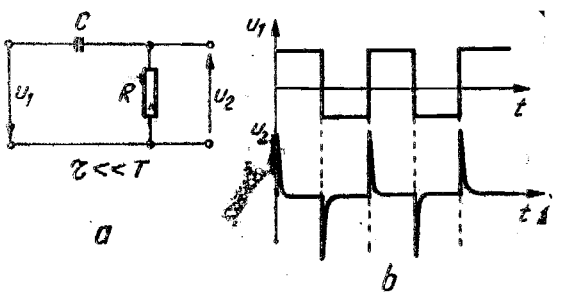


Fig. 10.14. Circuit de derivare.

În figura 10.14, *b* s-au reprezentat graficele semnalelor de la intrarea și de la ieșirea unui circuit de derivare

Probleme și întrebări recapitulative

1. Ce se înțelege printr-un generator de funcții?
2. Un generator de joasă frecvență funcționînd în intervalul 10 Hz—10 MHz poate înlocui un generator de audiofrecvență?
3. Un generator de semnal avînd impedanța de ieșire de 20 Ω este un generator de tensiune constantă sau de curent constant?
4. Cum se poate transforma un generator de tensiune constantă într-un generator de curent constant?
5. Cît este nivelul semnalului obținut la ieșirea de nivel mic a unui generator de semnal, dacă voltmetrul montat pe ieșirea de nivel mare indică 1,5 V, iar atenuatorul este pe poziția 1/100?

CAPITOLUL 11

APARATE ELECTRICE ȘI ELECTRONICE PENTRU MĂSURAREA MĂRIMILOR NEELECTRICE

În condițiile tehnicii moderne, aparatele electrice și electronice sînt folosite pe scară largă la măsurarea unui număr mare de mărimi neelectrice, în diferite domenii de activitate. Utilizarea acestor aparate s-a dezvoltat odată cu automatizarea proceselor tehnologice, cu introducerea calculatoarelor în prelucrarea datelor, cu utilizarea sistemelor de măsurare și telemăsurare etc.

● Măsurarea mărimilor neelectrice cu aparate electrice și electronice prezintă față de metodele neelectrice unele avantaje, cum sînt:

— precizie ridicată;
— viteză mare de măsurare;
— posibilități simple de măsurare în puncte multiple;
— posibilitatea automatizării proceselor de măsurare;
— posibilitatea prelucrării rapide a rezultatelor cu calculatoare;
— posibilitatea înregistrării și stocării rezultatelor;
— posibilitatea transferurilor la distanță (telemăsurări);
— posibilitatea multiplicării datelor (rezultatelor).

● Aparatele electrice și electronice pentru măsurarea mărimilor neelectrice, deși sînt de o foarte mare diversitate, au în general o structură comună, care este reprezentată sub formă simplificată în figura 11.1. Ele conțin un *traductor*, *dispozitive intermediare* și *dispozitivul de măsurat*.

Traductorul este un dispozitiv care convertește mărimea neelectrică de la intrarea sa într-o mărime electrică obținută la ieșire.

Dispozitivele intermediare prelucrează mărimea electrică obținută la ieșirea traductorului, pentru a putea fi aplicată dispozitivului de măsurat (dacă este prea mică o amplifică, dacă este o mărime alternativă o redresează etc.).

Dispozitivul de măsurat transformă mărimea electrică de la intrarea sa într-o informație de măsurare (produce la ieșire o mărime direct sesizabilă de operator sau aplicabilă unui înregistrator, unui calculator, unui dispozitiv de reglaj etc.).

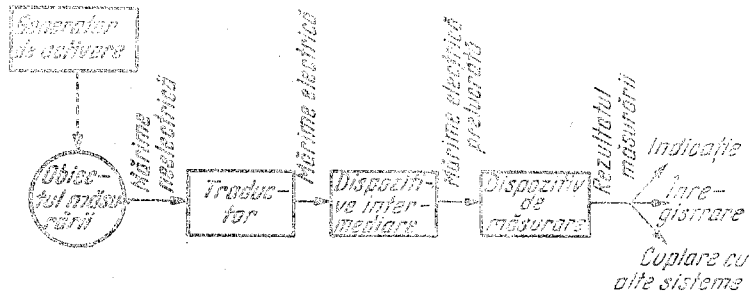


Fig. 11.1 Structura generală a aparatelor electrice pentru măsurarea mărimilor neelectrice.

A. TRADUCTOARE

1. CLASIFICAREA TRADUCTOARELOR

În aparatele electrice pentru măsurarea mărimilor neelectrice se folosește o mare varietate de traductoare. Ele se pot clasifica după mai multe criterii.

● **După natura mărimii neelectrice de la intrare**, traductoarele pot fi:

— *traductoare pentru mărimi geometrice* (lungime, arie, volum, grosime, nivel, unghi etc.);
— *traductoare pentru mărimi mecanice* (masă, forță, presiune, debit, viteză de rotație etc.);
— *traductoare de temperatură*;
— *traductoare pentru mărimi fotometrice*;
— *traductoare pentru radiații*;
— *traductoare pentru mărimi de compoziție* (concentrație etc.);
— *traductoare pentru mărimi de material* (densitate, viscozitate etc.).

● **După principiul de funcționare**, traductoarele pot fi:

— *traductoare generatoare*, care produc un semnal electric fără să fie alimentate cu energie electrică (de exemplu, termocupluri, tahogeneratoare, dispozitive fotoelectrice);

— *traductoare parametrice*, care necesită alimentare electrică și furnizează semnalul de ieșire sub forma variației unui parametru (de exemplu, termorezistențe, traductoare inductive sau capacitive de deplasare).

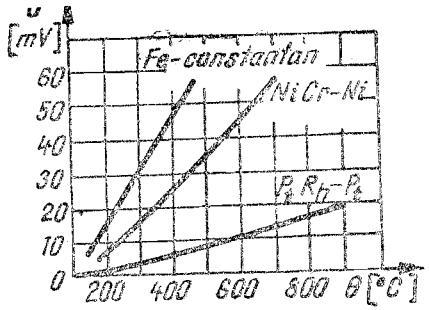


Fig. 11.2. Caracteristicile statice ale unor termocupluri.

● **După mărimea de la ieșire,** traductoarele pot fi:

— *traductoare analogice*, la care mărimea de la ieșire variază continuu;

— *traductoare digitale*, la care mărimea de la ieșire variază discontinuu, după un anumit cod.

2. CARACTERISTICILE TRADUCTOARELOR

● **Caracteristica statică** *reprezintă dependența între mărimea de ieșire și mărimea de intrare.* Ea se poate exprima printr-o ecuație, $y = f(x)$, sau prin reprezentare grafică. În figura 11.2 sînt reprezentate caracteristicile statice ale unor termocupluri.

● **Caracteristica dinamică** *reprezintă variația în timp a mărimii de ieșire la o anumită variație a mărimii de intrare.* În general un traductor trebuie să aibă o inerție cît mai mică și să urmărească cît mai fidel variațiile mărimii de intrare.

● **Precizia** traductorului se apreciază prin *eroarea tolerată* sau prin *clasa de precizie*, care este raportul între eroarea absolută maximă și intervalul de măsurare al traductorului respectiv. Majoritatea traductoarelor fabricate la IEA realizează o precizie de 0,5%.

● **Sensibilitatea** exprimă raportul între variația mărimii de ieșire și variația mărimii de intrare.

B. APARATE PENTRU MĂSURAREA TEMPERATURII

Temperatura este o mărime care caracterizează starea de încălzire a corpurilor. Măsurarea temperaturii unui corp se bazează pe schimbul de căldură între corpuri cu grade diferite de încălzire și pe variația cu temperatura a proprietăților fizice ale unor materiale.

Măsurarea temperaturii cu aparate electrice se realizează cel mai des folosind *traductoare de temperatură termoelectrice* sau *termorezistive.*

1. MĂSURAREA TEMPERATURII CU TRADUCTOARE TERMOELECTRICE

Traductoarele termoelectrice sînt realizate cu *termocupluri.*

a. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL TERMOCUPLURILOR

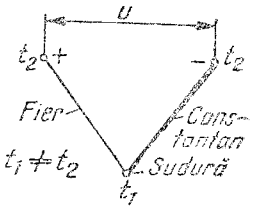


Fig. 11.3. Funcționarea unui termocuplu.

Un termocuplu (fig. 11.3) este un ansamblu alcătuit din două fire din materiale de conductibilități diferite, sudate între ele la unul dintre capete. Prin încălzirea locală a sudurii, la capetele libere apare o diferență de potențial (o tensiune termoelectromotoare). Valoarea acestei tensiuni depinde de materialele din care este făcut termocuplul și de diferența de temperatură dintre punctul de sudură și capetele libere (efect termoelectric sau efect Seebeck).

Explicația fenomenului termoelectric se bazează pe potențialul de ieșire al electronilor liberi din metale. În cazul sudurii între două materiale de conductibilități diferite, va avea loc o difuzie a electronilor liberi din materialul cu conductibilitate mai mare (cu mai mulți electroni liberi) în materialul cu conductibilitate mai mică. Din acest motiv, materialul cu conductibilitate mai mare se încarcă pozitiv (a cedat electroni), iar cel cu conductibilitate mai mică se încarcă negativ (a primit electroni) și la capetele libere apare o diferență de potențial. Fenomenul de difuzie este cu atît mai intens cu cît temperatura sudurii este mai mare, ceea ce explică dependența între valoarea tensiunii termoelectromotoare și diferența de temperatură între sudură și capetele libere ale termocuplului.

b. CONSTRUCȚIA TERMOCUPLURILOR

Termocuplurile sînt utilizate pentru măsurarea temperaturilor mari, între 300°C și 1 600°C. Practic un termocuplu (fig. 11.4) este realizat din doi electrozi sub formă de fire sau benzi, sudați între ei la un capăt (*1* — punctul de sudură). Pentru o bună funcționare a termocuplului este necesară protejarea acestuia împotriva acțiunii gazelor fierbinți

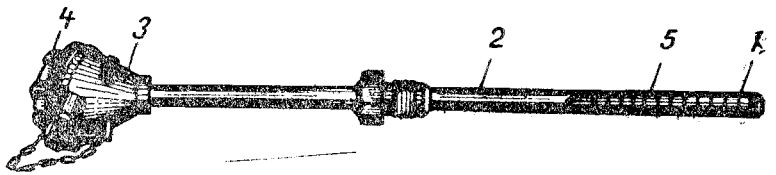


Fig. 11.4. Construcția unui termocuplu.

sau corosive care pot distruge electrozii. Din acest motiv, termocuplul se introduce într-o teacă de protecție *2*. Capătul termocuplului opus sudurii formează o cutie *3* unde se găsesc bornele de legătură. Pentru a proteja conexiunile cutia se închide cu un capac *4*. Electrozii sînt izolați electric între ei și fiecare față de teaca de protecție cu mărgele izolatoare *5*.

În R.S.R. se fabrică: termocupluri din platină cu platină-rodiu, cu precizie foarte ridicată, folosite pentru măsurarea temperaturilor pînă la (1 300—1 400)°C; termocupluri din cromel cu alumel, folosite în intervalul de temperaturi (0—1 200)°C și termocupluri din fier cu constantan, folosite în intervalul de temperaturi (0—550)°C.

c. CONECTAREA TERMOCUPLURILOR LA APARATELE DE MĂSURAT

Măsurarea cu termocupluri este precisă numai dacă se menține constantă temperatura capetelor libere. Deoarece temperatura capetelor libere este adeseori variabilă, fiind influențată de punctul cald, termocuplurile se prelungesc pînă într-o zonă cu temperatură constantă, unde se află dispozitivul de măsurat, cu conductoare de legătură. Aceste conductoare trebuie să fie realizate din aceleași materiale ca și termocuplul sau (în cazul termocuplurilor din materiale nobile) din alte materiale mai ieftine dar care sînt identice din punct de vedere termoelectric cu materialele termocuplului, astfel încît în punctele de legătură să nu se dezvolte tensiuni termoelectromotoare suplimentare. În acest caz, capetele reci ale termocuplului (punctele *1* și *2* în figura 11.5) pot avea temperatura variabilă într-un interval restrîns, în timp ce punctele *3* și *4* — fiind la distanță — pot fi menținute mai ușor la o temperatură constantă.

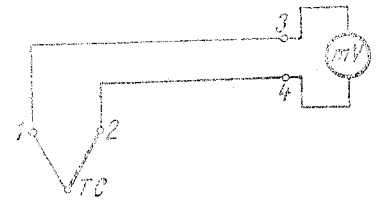


Fig. 11.5. Conectarea unui termocuplu la un aparat.

Traductoarele termorezistive se întîlnesc în două variante: *termorezistențe* și *termistoare*.

a. TERMOREZISTENȚE

Termorezistențele sînt utilizate pe scară largă în industrie la măsurarea temperaturilor cuprinse între —200°C și +500°C. Principiul de funcționare al termorezistențelor se bazează pe proprietatea materialelor conductoare (Pt, Cu, Ni, Fe) de a-și modifica rezistența electrică în funcție de temperatură. Această variație se poate exprima cu relația:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \tag{11.1}$$

unde α este coeficientul de variație cu temperatura al rezistenței electrice.

Din punct de vedere constructiv, termorezistențele se prezintă sub formă de fire sau benzi care se înfășoară pe un suport cilindric sau sub formă de plăcuță. Termorezistențele sînt montate în cîte o teacă de protecție și sînt prevăzute cu o cutie cu borne ca la termocupluri.

În R.S.R. se fabrică termorezistențe din platină utilizate în intervalul (—200...+500)°C și termorezistențe din cupru (care sînt mai ieftine) utilizate în intervalul de temperatură (0...+120)°C.

b. TERMISTOARE

Termistoarele sînt traductoare termorezistive realizate din materiale semiconductoare. Variația rezistenței unui termistor în funcție de temperatură este:

$$R_t = R_0\, e^{\frac{b}{T}}, \tag{11.2}$$

unde T este temperatura absolută, iar b — o constantă care depinde de materialul din care este făcut termistorul. După cum se vede din relația (11.2), coeficientul de variație a rezistenței unui termistor cu temperatura este negativ.

● În comparație cu termorezistențele, termistoarele prezintă următoarele **avantaje**:

— au sensibilitatea mare deoarece coeficientul de variație al rezistenței cu temperatura este mare;

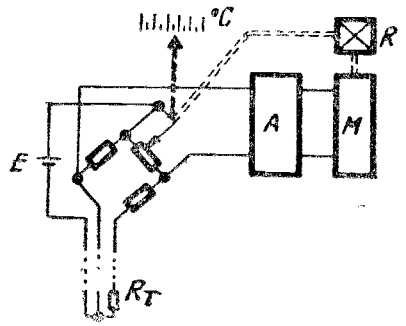


Fig. 11.6. Punte echilibrată automată cu traductor termorezistiv.

— pot fi folosite la măsurări la distanță deoarece rezistența lor fiind mare, se poate neglija rezistența conductoarelor de legătură;

— au dimensiuni reduse și inerție termică mică.

● **Dezavantaje.** În schimb, termistoarele sînt mai instabile decît termorezistențele metalice, au dispersie mare a valorilor parametrilor, caracteristică puternic neliniară și temperatură maximă de utilizare mai redusă.

● **Pentru măsurarea temperaturilor** cu traductoare termorezistive, acestea se folosesc în *montaje de punte echilibrate* sau *neechilibrate*.

În figura 11.6 este reprezentată o **punte echilibrată automată.** Traductorul termorezistiv este conectat într-un braț al punții, iar în alt braț este prevăzut o rezistență variabilă. La creșterea temperaturii, rezistența electrică R_T a traductorului se modifică și puntea se dezechilibrează. Tensiunea de dezechilibru este amplificată de amplificatorul A și se aplică unui motor, care prin intermediul unui reductor schimbă poziția cursorului rezistenței variabile. Cînd puntea este adusă la echilibru prin varierea rezistenței reglabile, motorul se oprește. Poziția cursorului va depinde de variația rezistenței R_T. Prin urmare, poziția cursorului rezistenței variabile poate indica direct (printr-o gradare corespunzătoare) valori ale temperaturii.

Pe acest principiu se produc la Întreprinderea de Elemente de Automatizare din București diferite aparate indicatoare și înregistratoare pentru măsurarea temperaturilor.

Probleme și întrebări recapitulative

1. Care sînt avantajele măsurării mărimilor neelectrice cu aparate de măsurat electrice sau electronice?
2. Prin ce se deosebesc traductoarele generatoare de traductoarele parametrice?
3. Explicați funcționarea unui termocuplu!
4. În ce interval de temperatură se utilizează termocuplurile? Dar termorezistențele?
5. Comparați avantajele și dezavantajele termorezistențelor și termistoarelor!

CUPRINS

Cap. 1. Transformatoare de măsurat 3
A. Transformatoare de curent 4
B. Transformatoare de tensiune 9

Cap. 2. Măsurarea puterii și energiei electrice în circuite de curent alternativ trifazate 13
A. Măsurarea puterii active în circuite trifazate 14
B. Măsurarea puterii reactive în circuite trifazate 20
C. Măsurarea energiei electrice în circuite trifazate 24

Cap. 3. Măsurarea puterii electrice în circuite electronice 26
A. Determinarea puterii prin măsurarea tensiunii sau intensității curentului pe o rezistență de valoare cunoscută . . 26
B. Wattmetre pentru frecvențe înalte. Wattmetrul cu termocupluri 29
C. Determinarea puterii prin transformarea energiei electromagnetice în alte forme de energie 31

Cap. 4. Aparate și metode pentru măsurarea impedanțelor 33
A. Generalități 33
B. Metode pentru măsurarea impedanțelor 36

Cap. 5. Măsurarea frecvențelor 48
A. Metode de comparație 48
B. Metode de rezonanță 49
C. Metode directe 51

Cap. 6. Osciloscopul 55
A. Generalități 55
B. Construcție și funcționare 57
C. Măsurări cu ajutorul osciloscopului 67

Cap. 7. Voltmetre electronice 74
A. Generalități 74
B. Voltmetre electronice de curent continuu 76
C. Voltmetre electronice de curent alternativ 79
D. Milivoltmetre electronice 84
E. Multimetre electronice 87

Cap. 8. Aparate de măsurat digitale 89

A. Generalități 89
B. Părțile componente ale aparatelor de măsurat digitale . . 92
C. Tipuri de aparate de măsurat digitale 106

Cap. 9. Aparate pentru măsurarea dispozitivelor semiconductoare . . 118

A. Tranzistormetre 118
B. Caracterografe 123

Cap. 10. Generatoare de semnal 125

A. Generalități 125
B. Generatoare de semnale sinusoidale 127
C. Generatoare de semnale dreptunghiulare 134
D. Generatoare de tensiuni liniar-variabile (TLV) 137
E. Generatoare de impulsuri scurte 138

Cap. 11. Aparate electrice și electronice pentru măsurarea mărimilor neelectrice 140

A. Traductoare 141
B. Aparate pentru măsurarea temperaturii 142

Număr plan : 16506.
Coli de tipar : 9,25
Bun de tipar : 7. 06. 82

Tiparul executat sub comanda nr. 413 la I.P. „Filaret", str. Fabrica de chibrituri nr. 9—11, București
Republica Socialistă România